Р. Г. ГЕМКЕ

Неисправности электрических машин

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Р. Г. ГЕМКЕ

Неисправности электрических машин

Под редакцией Р. Б. Уманцева

9-е издание,
переработанное и дополненное



Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1989



ББК 31.261
Г33
УДК 621.313.004.64

Редактор *Л. М. Пархоменко*

Гемке Р. Г.
Г33 Неисправности электрических машин/Под ред. Р. Б. Уманцева.— 9-е изд., перераб. и доп.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.— 336 с.: ил.
ISBN 5-283-04431-9

Рассмотрены встречающиеся в эксплуатации и при монтаже неисправности машин постоянного и переменного тока, а также трансформаторов подстанций напряжением до 11кВ. Даны рекомендации по выявлению и устранению неисправностей. Изложены практические методы устранения повышенных вибраций машин и агрегатов с жесткими и гибкими роторами. Восьмое издание вышло в 1975 г. Девятое издание переработано и дополнено.

Для инженерно-технических работников и квалифицированных рабочих, занятых эксплуатацией и монтажом электрооборудования.

Г $\frac{2202070100-108}{051(01)-89}$ 136—89

ББК 31.261

© Издательство «Энергия», 1975

© Энергоатомиздат, 1989, с изменениями и дополнениями

ISBN 5-283-04431-9

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга «Неисправности электрических машин» вышла первым изданием в 1937 г. Ее автор Рудольф Георгиевич Гемке, много лет работавший на заводе «Электросила» имени С. М. Кирова в Ленинграде, изложил в ней свой богатый практический опыт по выявлению и устранению электрических и механических неисправностей электрических машин.

В последующие издания, вышедшие после смерти Р. Г. Гемке, при редактировании вносились необходимые дополнения и изменения. Внесены дополнения в разделы, где рассматриваются местные перегревы турбогенераторов, дефекты воздухоохладителей, устранение механических неисправностей; введен раздел о неисправностях трансформаторов (написан инженером Л. Б. Ривлиным). В связи с серьезными достижениями за последние годы в области теории и практики устранения вибраций электрических машин было заново написано приложение 14 (инженерами Л. И. Клейманом и Б. Х. Перчаноком).

В течение 50 лет книга является настольным пособием для инженерно-технических работников и рабочих, занятых монтажом и эксплуатацией электрических машин. Приведенные в ней рекомендации многократно проверены практической работой специализированных организаций по ремонту электрооборудования.

В настоящее, девятое, издание внесены необходимые изменения и дополнения, связанные с введением новых нормативных материалов и технической терминологии.

В целях удобства пользования книгой описание **неисправности и ее признаков** дано жирным шрифтом, *причины неисправности* — курсивом, а указания по нахождению повреждения и его устранению — обычным шрифтом с отступом.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Р. Б. Уманцев

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1-1. ИСКРЕНИЕ ЩЕТОК

1-1-1. Искрят все щетки или часть их. Искрение сопровождается повышенным нагревом коллектора и щеток.

А. *Щетки установлены неправильно.*

Проверить положение щеток по заводским меткам, имеющимся на траверсе (см. приложение 4).

Б. *Расстояние по окружности коллектора между щетками отдельных бракетов неравномерно.*

Проверить положение щеток на коллекторе при помощи бумажной ленты и установить бракеты так, чтобы щетки соседних бракетов находились на одинаковом расстоянии по окружности коллектора. Нельзя устанавливать щетки, отсчитывая определенное число коллекторных пластин (см. приложение 4). Небольшое искрение щеток нереверсивных машин может быть устранено в некоторых случаях незначительным сдвигом траверсы.

В. *Щетки в плохом состоянии и неправильно установлены в щеткодержателях.* Угольные щетки имеют неровную обгоревшую рабочую поверхность с царапинами, набитыми медной пылью; плохо пришлифованы; их края обломаны или обгорели. Металлические щетки загрязнены, обгорели, и концы их расплющены. Размеры обойм щеткодержателей не соответствуют размерам щеток (слишком велик или слишком мал зазор между щеткой и обоймой щеткодержателя); плохой контакт между щетками и их арматурой; мало сечение токоведущих кабельков (жгутиков).

Правильно установить щеткодержатели и щетки. Угольные щетки тщательно пришлифовать к коллектору стеклянной шкуркой (применение наждачной бумаги не рекомендуется; см. приложение 4). Металлические щетки промыть в бензине и пригнать к коллектору.

Г. *Щеткодержатели установлены неправильно.* Слишком велико расстояние между обоймой щеткодержателя и коллектором; установка реактивного щеткодержателя не соответствует направлению вращения. В результате этих недостатков щетка заклинивается.

Правильно установить щеткодержатели (см. приложение 4).

Д. *Щеточный бракет слабо закреплен и поэтому вибрирует.*

Подтянуть болты, крепящие бракет к траверсе.

Е. *Щетки слабо прилегают к коллектору.*

Сильнее прижать щетки; в случае надобности укоротить нажимную пружину щеткодержателя, но лучше заменить ее новой. У щеткодержателей, допускающих регулировку нажатия на щетку, установить требуемое нажатие. Рекомендуемое нажатие щеток и его проверку см. в приложениях 4 и 5.

Ж. *Щетки слишком сильно прижаты к коллектору.*

Ослабить нажатие щеток; в случае надобности растянуть нажимную пружину щеткодержателя, но лучше заменить ее новой. У щеткодержателей, допускающих регулировку нажатия на щетку, установить требуемое нажатие (см. п. Е).

З. *Поставлены угольные щетки неподходящей марки (слишком мягкие или слишком твердые).* Использованы щетки разных марок (это нередко случается при замене сработавшихся щеток). Вследствие различной проводимости щеток нагрузка на них распределяется неравномерно.

Установить щетки, соответствующие предписанию завода-изготовителя. Применять щетки только одной марки (выбор щеток — см. приложеине 5). Если одинаковые щетки для всей машины получить невозможно, то распределить имеющиеся щетки таким образом, чтобы на каждом бракете находились щетки только одной марки. В случае продолжающегося искрения щеток снизить нагрузку.

И. *Нажатие на щетки неодинаково, вследствие чего ток между ними распределяется неравномерно.*

Регулировкой щеткодержателей добиться, чтобы нажатие на все щетки было одинаковым в пределах допуска (см. пп. Е, Ж).

К. *Плохой контакт в токособирательных кольцах; ослаблены стяжные болты; загрязнены или окислены контактные поверхности в местах соединения бракетов щеткодержателей и токособирательных колец, между щеткодержателями и бракетами, между щетками и щеткодержателями, что приводит к неравномерному распределению тока между отдельными стержнями, особенно у машин на большую силу тока.*

Проверить, вычистить и исправить все контакты токопроводящей и токособирательной систем: между бракетами щеткодержателей и токособирательными кольцами,

между токоподводящими кабелями и токособирательными кольцами, между щеткодержателями и стержнями щеткодержателей, между щетками и щеткодержателями. Места плохого контакта обычно легко обнаруживаются при наружном осмотре, так как они сильно нагреваются и часто имеют цвета побежалости.

Если же наружным осмотром не удается найти место плохого контакта, то необходимо измерить точным вольтметром падение напряжения во всех указанных местах токоведущей и токособирательной систем; при плохом контакте падение напряжения будет увеличено.

Л. *Наблюдается повышенная вибрация щеточного аппарата. Частота собственных колебаний щеточного аппарата совпадает с частотой его вынужденных колебаний (резонансные явления), вызываемых выступающими коллекторными пластинами или вибрацией коллектора.* При этом искрение усиливается при какой-либо одной частоте вращения и ослабевает при уменьшении или увеличении ее.

Увеличить жесткость щеточного аппарата, например скрепить концы бракетов планками из изолирующего материала (гетинакс, текстолит), прикрепив их винтами к торцам бракетов.

М. *Главные и добавочные полюсы расположены неравномерно.*

Проверить расстояния между краями башмаков соседних главных полюсов, а также между краями башмаков добавочных и соседних главных полюсов. По опытным данным, расстояния в первом случае не должны отличаться друг от друга более чем на 1,5 мм при диаметре якоря до 600 мм и более чем на 2 мм при диаметре якоря свыше 600 мм; во втором случае расстояния не должны отличаться друг от друга более чем на 1 мм.

1-1-2. Щетки искрят; генератор плохо возбуждается; двигатель плохо идет в ход или работает с ненормальной частотой вращения; обмотка якоря местами сильно нагревается.

А. *Некоторые соседние пластины коллектора замкнуты заусенцами, не удаленными после обточки коллектора.*

Осторожно удалить все заусенцы острым шабером; отшлифовать коллектор стеклянной шкуркой, а в случае надобности обточить (см. приложение 4).

Б. *Между петушками коллектора или хомутиками имеется замыкание, например наплывами олова, не удаленными после пайки.*

Осмотреть все петушки и хомутики, устранить замыкания; затекшее олово осторожно удалить.

В. *В одной или нескольких якорных катушках имеется междувитковое соединение или короткое замыкание.*

Найти междувитковое соединение (см. приложение 8) и устранить его.

Поврежденные якорные катушки заменить новыми или перемотать. Если число коллекторных пластин не очень мало, то в виде временной меры можно отсоединить неисправную катушку от коллектора (см. приложение 8). Частичная переизолировка поврежденных мест обмотки нежелательна, так как перегрев вызывает в большинстве случаев повреждение всей изоляции неисправной катушки, вследствие чего существует опасность образования в дальнейшем новых междувитковых соединений.

1-1-3. Машина начинает искрить при частичной нагрузке. При холостом ходе машина не искрит. По мере возрастания нагрузки искрение увеличивается и достигает в некоторых случаях недопустнмой величины.

А. *Щетки расположены неправильно; неисправен щеточный аппарат.*

Проверить и исправить щеточный аппарат (см. приложение 4). Причины и устранение неисправности см. также в п. 1-1-1, А—К.

Б. *Главные и добавочные полюсы чередуются неправильно.*

Проверить и установить правильное чередование полярности главных и добавочных полюсов (см. приложение 2).

В. *Неправильная полярность отдельных главных или добавочных полюсов.*

Устранить неправильную полярность главных и добавочных полюсов (см. приложение 2).

Г. *Обмотка добавочных полюсов частично или полностью шунтируется другой обмоткой.*

Отыскать место замыкания между обмотками и устранить замыкание.

1-1-4. Щетки равномерно искрят при нагрузке. При холостом ходе машина не искрит.

Зазор между якорем и отдельными или всеми добавочными полюсами не соответствует паспорту машины. После ремонта или ревизии возможна, по небрежности, неправильная установка прокладок между сердечниками добавочных полюсов и станиной.

Проверить и установить под всеми добавочными полюсами зазор, предписанный заводом-изготовнтелем. Проверить методом подпитки (см. приложение 7) нли более грубо, пробным передвижением щеток, насколько

сильны или слабы добавочные полюсы. Если искрение исчезает или уменьшается при передвижении щеток против направления вращения у генератора и по направлению вращения у двигателя, то добавочные полюсы слишком сильны; если же искрение в этих случаях усиливается, то добавочные полюсы слишком слабы. Если добавочные полюсы слабы, то нужно зазор уменьшить, если же они сильны, то его надо увеличить. Регулировку добавочных полюсов см. в приложении 7.

1-1-5. Наблюдается незначительное искрение под щетками. Неисправности в машине отсутствуют.

Неправильно выбрана марка щеток.

Поставить щетки другой марки (см. приложение 5). Если искрение не вызывает почернения коллектора и нагара на щетках, то смену щеток можно и не производить.

1-1-6. Щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов.

А. *Расстояние между щетками по окружности коллектора различно, или же имеется какая-либо другая неисправность щеточного аппарата.*

Наладить щеточный аппарат (см. п. 1-1-1, Б, В, Е, Ж, З, К).

Б. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в обмотке одного из добавочных или главных полюсов.*

Найти неисправную катушку (см. приложение 8), отремонтировать ее или заменить новой.

1-1-7. Наблюдается переходящее, блуждающее и по временам исчезающее искрение при нагрузке.

Плохой контакт в щеточном аппарате.

Наладить щеточный аппарат (см. п. 1-1-1, В, Е, К).

1-1-8. Щетки искрят, наблюдается почернение лишь некоторых коллекторных пластин, находящихся на определенном расстоянии друг от друга (соответственно числу полюсов или пар полюсов). После каждой чистки или обточки коллектора чернеют одни и те же пластины.

А. *Плохой контакт в якоре.* Дефект имеет место большей частью в соединениях между обмоткой и коллектором (в петушках) вследствие плохой пайки.

Тщательно проверить пайку всех соединений между обмоткой якоря и почерневшими пластинами коллектора. Все неисправные и внушающие подозрение места пайки вновь перепаять. Наружным осмотром редко удается обнаружить плохую пайку, поэтому рекомендуется проверить пайку методом падения напряжения (см. приложение 8). Если это неосуществимо из-за отсутствия по-

стоянного тока или милливольтметра, то следует все соединения между обмоткой и чернеющими пластинами вновь перепаять.

Лобовые части чернеющих пластин коллектора отметить кернером, что облегчит дальнейший контроль.

Коллектор обточить; изоляцию между пластинами продорожить (см. приложение 4).

Б. *Отдельные пластины коллектора выступили или запали.*

Обточить коллектор (см. приложение 4).

В. *Короткое замыкание в якоре.*

См. п. 1-1-2, А и Б.

Г. *Уравнительные соединения отпаялись.*

Если после того как пайка обмотки и петушков проверена и исправлена, а коллектор обточен, продолжается почернение одних и тех же пластин, то следует проверить пайку уравнительных соединений.

Д. *Отсутствуют уравнительные соединения.*

Поставить уравнительные соединения по указанию завода-изготовителя.

Е. *Число уравнительных соединений недостаточно.*

Поставить дополнительные уравнительные соединения по указанию завода-изготовителя.

1-1-9. Щетки искрят, наблюдается почернение определенных пластин коллектора, как указано в п. 1-1-8. Изоляция между двумя или несколькими коллекторными пластинами сильно выгорела. Иногда с треском вылетают длинные искры в момент выхода неисправных мест коллектора из-под щеток. Временами в неисправных местах наблюдается накаливание изоляции между пластинами коллектора.

Обрыв в катушке якоря, находящейся между почерневшими пластинами коллектора. Обрыв большей частью находится в соединениях между коллекторами и обмоткой, редко — в самой обмотке.

Найти место обрыва (см. приложение 8).

При обрыве в соединениях между обмоткой и коллектором поступить, как указано в п. 1-1-8, А. При обрыве в обмотке заменить неисправную катушку новой. В качестве временной меры, если число коллекторных пластин не слишком мало, можно соединить накоротко две соседние пластины, к которым присоединена секция, имеющая обрыв (см. приложение 8).

1-1-10. Щетки искрят, наблюдается почернение каждой второй или третьей пластины коллектора.

А. *Ослабла затяжка коллектора.*

Затянуть и обточить коллектор (см. приложение 4).

Б. *Между пластинами коллектора выступает изоляция.*

Продорожить изоляцию между пластинами коллектора на глубину 1,5—2 мм; после этого коллектор в случае надобности обточить и отшлифовать стеклянной шкуркой (см. приложение 4).

1-1-11. Щетки искрят, наблюдается переходящее почернение пластин коллектора, т. е. после каждой чистки коллектора чернеют другие пластины.

А. *Между отдельными пластинами коллектора незначительно выступает изоляция.*

См. п. 1-1-10, Б.

Б. *Неисправен щеточный аппарат.*

1-1-12. Щетки искрят, хотя щеточный аппарат в порядке, щетки установлены правильно, коллектор чист и изоляция между коллекторными пластинами не выступает.

А. *Если нагрев у машины нормальный, то причиной неисправности является недопустимо большой износ коллектора, что наблюдается преимущественно у машин низкого напряжения.*

Поставить новый коллектор.

Б. *Если имеет место повышенное нагревание якоря* (см. п. 1-3-1), *то это означает, что машина перегружена.*

Устранить перегрузку.

В. *Если при повышенном нагреве якоря наблюдается неравномерное нагревание отдельных катушек главных полюсов, то налицо междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких катушках главных полюсов* (искажение магнитного поля вызывает появление уравнительных токов в якоре).

Найти неисправные катушки (см. приложение 8), отремонтировать их или заменить новыми.

Г. *Если якорь сильно нагревается даже у ненагруженной машины и щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов, то причиной неисправности является плохая центровка якоря, при которой зазор между якорем и отдельными полюсами неодинаков.* Это может иметь место вследствие выработки подшипниковых вкладышей или неравномерного оседания фундамента у крупных машин (когда подшипниковые стояки установлены не на общей фундаментной плите со станиной), а также из-за плохой центровки якоря при монтаже машины.

Неравномерность зазора между якорем и полюсами приводит к тому, что магнитное поле становится неоднородным и в отдельных ветвях обмотки якоря индуктируются различные электродвижущие силы, вследствие чего возникают внутренние уравнительные токи. При значительной неравномерности зазоров уравнительные токи (особенно в машинах с небольшим числом

уравнительных соединений) служат причиной сильного нагревания якоря и искрения щеток.

Перезалить вкладыши подшипников или заменить их новыми. Отрегулировать зазоры между якорем и полюсами (см. приложение 12), не нарушая центровку якоря с сопряженной машиной.

1-1-13. Щетки искрят, дрожат, сильно шумят; на коллекторе видны следы обгорания; коллектор почернел на всей окружности или на большей ее части; поверхность коллектора испещрена бороздками (волнообразна); коллектор и щетки сильно нагреваются.

А. *Коллектор негладкий или бьет.* Вся машина вибрирует. Под действием центробежных сил коллектор деформирован; отдельные коллекторные пластины выступают; затяжка коллектора ослабла.

Неравномерный износ коллекторных пластин может быть вызван различной твердостью меди (редко встречающийся случай).

Проверить биение коллектора (см. приложение 12). Коллектор подтянуть и обточить, изоляцию между пластинами продорожить (см. приложение 4). Устранить вибрацию машины (см. приложение 14).

Б. *Между пластинами коллектора выступает изоляция.* Это нередко наблюдается в машинах быстроходных, например у возбудителей турбогенераторов.

Продорожить коллектор (см. приложение 4).

В. *Щетки поставлены неправильно, вследствие чего коллектор изнашивается неравномерно.*

Правильно установить щетки (см. приложение 4).

1-1-14. Щетки искрят; коллектор покрыт слоем окиси, которая после чистки коллектора образуется вновь даже в том случае, если машина не работает.

Кислотные пары или газы в машинном помещении вызывают химическое разрушение меди коллектора.

Прочищать коллектор в холодном состоянии стеклянной шкуркой перед каждым пуском машины (см. приложение 4). Если на машине установлены угольные щетки, то пользоваться по возможности твердыми щетками. Лучше всего установить новую машину закрытого типа (герметическую).

1-1-15. Наблюдается легкое круговое искрение; по поверхности коллектора со щеток одного полюса на щетки другого полюса перескакивают искры.

А. *Коллектор загрязнен ввиду чрезмерного смазывания или применения слишком мягких угольных щеток.*

Протереть коллектор чистой неволокнистой тряпкой, слегка смоченной в бензине (но не пропитанной им!), и отшлифовать мелкой стеклянной шкуркой (см. приложение 4); поставить более твердые щетки.

Б. *Коллектор загрязнен вследствие сильного износа щеток, вызываемого негладкостью коллектора или применением неподходящих щеток. Загрязнение возможно из-за небрежной чистки и продувки машины после притирки щеток или шлифовки коллектора, а также плохого ухода за машиной.*

Неровный коллектор отшлифовать или обточить и продорожить изоляцию между пластинами коллектора (см. приложение 4); неподходящие щетки заменить новыми, рекомендуемыми заводом-изготовителем, либо в соответствии с приложением 5.

Коллектор содержать в чистоте. После каждой притирки щеток и шлифовки коллектора тщательно очищать пылесосом и продувать сжатым воздухом коллектор и щеточный аппарат.

1-1-16. Круговой огонь по коллектору.

А. *Щетки расположены неправильно.*

Проверить положение щеток (см. приложение 4).

Б. *Главные и добавочные полюсы чередуются неправильно (добавочные полюсы неправильно соединены с якорем).*

Проверить правильность чередования главных и добавочных полюсов (см. приложение 2).

В. *Выбрана неподходящая марка щеток.* Частицы угля, оторвавшиеся от щеток при их износе, образуют проводящие мостики между пластинами коллектора и сильно накаляются. При коротких замыканиях небольшие раскаленные угольные частицы отрываются от мягких графитных щеток, что приводит к образованию кругового огня.

Заменить щетки более твердыми, лучше всего электрографитными, обладающими наибольшей механической прочностью и легче всего переносящими короткое замыкание (см. приложение 5).

Г. *При коротких замыканиях во внешней цепи щетки накаливаются и под ними собирается много токопроводящего пара, ионизирующего воздух.* Вследствие этого между смежными пластинами коллектора, при выходе их из-под щеток, возникают небольшие дуги. Если короткое замыкание продолжается достаточно долго, то такие дуги возникают между соседними пластинами по всему коллектору и переходят в круговой огонь.

Для защиты от коротких замыканий установить быстродействующий автоматический выключатель. Машины, подвергающиеся частым коротким замыканиям,

снабдить электрографитными щетками (см. приложение 5).

1-1-17. При перемене направления вращения двигателя щетки сильно искрят.

Изменение направления вращения двигателя производится слишком быстро.

Избегать слишком быстрого изменения направления вращения двигателя. Если же это необходимо по условиям производства, то запросить рекомендации у завода-изготовителя.

1-1-18. При вращении двигателя в одном направлении щетки искрят сильнее, чем при вращении в другом направлении; наблюдается постоянная склонность к искрению при вращении двигателя в каком-либо направлении; двигатель вращается в одном направлении быстрее, чем в другом.

А. *Щетки стоят не на нейтрали.*

Проверить нейтраль и правильно установить щетки (см. приложение 4).

Б. *У двигателя устаревшей конструкции отсутствуют добавочные полюсы.*

Для реверсивной работы применять только двигатели с добавочными полюсами.

1-2. ПЕРЕГРЕВ МАШИНЫ

Равномерно перегрета вся машина. Других признаков ненормальной работы нет.

А. *Машина перегружена.*

Если снизить нагрузку невозможно, то запросить завод-изготовитель о наибольшей допустимой нагрузке машины.

При отсутствии искрения щеток усилить вентиляцию машины посредством установки вентилятора или вентиляционных крыльев на якоре (запросить завод-изготовитель о способах усиления вентиляции).

Б. *Двигатель, предназначенный для кратковременной или повторно-кратковременной работы (например, крановый или тяговый), эксплуатируется длительно.*

Соблюдать номинальный режим работы машины.

В. *Вентиляционные пути машины засорились; активная сталь и обмотки покрылись теплоизолирующим слоем мелких волокон и пыли.* Это особенно часто встречается на текстильных, цементных, бумажных и деревообделочных фабриках и заводах.

Тщательно очистить машину и продуть ее сжатым

воздухом (давлением не более 0,2 МПа[1]). Перед продуванием убедиться в том, что поступающий воздух чист и сух. При продувании не пользоваться металлическими мундштуками с острыми краями, так как ими можно легко повредить изоляцию обмоток. Следить за тем, чтобы пыль выдувалась из машины, а не перегонялась из одной ее части в другую.

Г. *Направление вращения машины, имеющей вентилятор с наклонными крыльями, выбрано неправильно, что значительно снижает подачу воздуха.*

Переменить направление вращения машины или переставить крылья вентилятора.

Д. *Воздушный канал или трубопровод (у машин с подводимым извне охлаждающим воздухом) обладает недостаточным сечением или же имеет слишком много изгибов.*

Увеличить площадь сечения канала или трубопровода до нужной величины; устранить излишнее число изгибов.

Е. *Засорились воздушные фильтры.*

Матерчатые фильтры очистить от грязи и пыли. Чистку удобнее всего производить пылесосом. Висциновые фильтры промыть сначала керосином, а затем горячим раствором соды и заполнить свежим маслом.

Ж. *Неисправен воздухоохладитель* (см. § 4-9).

Отсутствие тепловой изоляции воздухопровода для выходящего воздуха в машине с замкнутой системой вентиляции повышает нагрев машины. В подобных случаях рекомендуется установить тепловую изоляцию на выводном воздухопроводе.

1-3. ПЕРЕГРЕВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

1-3-1. Вся обмотка якоря нагревается равномерно, наблюдается склонность к искрению; генератор отдает или двигатель берет ток больше номинального; частота вращения двигателя меньше номинальной, несмотря на нормальное напряжение в сети (последнее не относится к двигателям со смешанным возбуждением, у которых с увеличением нагрузки частота вращения может повышаться).

См. § 1-2, п. А.

1-3-2. При нормальной нагрузке машины частота вращения меньше номинальной; вся обмотка якоря нагревается равномерно.

---

[1] 1 кгс/см$^2 \approx$ 0,1 МПа (с точностью до 1,97 %).

Ухудшены условия вентиляции машины.

Довести частоту вращения машины до номинальной: у генератора — увеличив частоту вращения первичного двигателя или изменив подбор шкивов при ременной передаче, а у двигателей — увеличив регулировочное сопротивление в параллельной обмотке, т. е. ослабив поле.

1-3-3. Щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов. Зазор между якорем и отдельными полюсами неодинаков.

См. п. 1-1-12, Г.

1-3-4. Щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов. Генератор дает номинальное напряжение только при повышенной частоте вращения. Двигатель при номинальном напряжении и правильном сопротивлении регулировочного реостата вращается слишком быстро. Катушки полюсов нагреваются равномерно.

Наиболее вероятной причиной является неправильное чередование главных полюсов вследствие неправильного соединения одной или нескольких катушек, что создает ненормальное магнитное поле и вызывает появление уравнительных токов в якоре.

Устранить неправильность чередования полюсов (см. приложение 2).

1-3-5. То же, что в п. 1-3-4, но катушки полюсов нагреваются неравномерно.

Междувитковое соединение в одной или нескольких катушках главных полюсов искажает магнитное поле.

См. п. 1-1-6, Б, также п. 1-1-12, В.

1-3-6. Генератор плохо возбуждается. Двигатель плохо идет в ход, в некоторых случаях якорь с трудом разворачивается или идет в ход толчками. При возбуждении генератора от постороннего источника якорь тотчас же после включения возбуждения сильно нагревается, причем отдельные катушки нагреваются неравномерно. Из якоря при этом обычно выделяется дым. Пластины коллектора, соединенные с дефектной нагревающейся катушкой якоря, обгорают; если якорь имеет уравнительные соединения, то обгорают также пластины, находящиеся на расстоянии двойного полюсного деления от этих первых пластин.

А. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких якорных катушках.*

Найти неисправные катушки (см. приложение 8), отремонтировать их или заменить новыми.

Б. *Заусенцы, образовавшиеся при обточке коллектора, вызвали короткое замыкание обмотки якоря через пластины коллектора.*

См. п. 1-1-2, А.

В. *Вследствие соединения между отдельными петушками или хомутиками произошло короткое замыкание обмотки.*

См. п. 1-1-2, Б.

1-4. ПЕРЕГРЕВ КОЛЛЕКТОРА И ЩЕТОК

1-4-1. Щетки дрожат и искрят; поверхность коллектора негладкая; щетки сильно шумят.

См. п. 1-1-13, А—В.

1-4-2. Коллектор темнеет, хотя щетки не искрят, а поверхность коллектора гладкая.

А. *Выбрана неподходящая марка щеток.*

Проверить нагрев коллектора при щетках других марок.

Б. См. п. 1-1-1, Ж.

1-4-3. Щетки искрят; края щеток по временам раскаляются и обгорают; арматура и медные жгутики отдельных щеток сильно нагреваются, а в некоторых случаях даже перегорают.

Плохие контакты в щеточном аппарате и в цепи токопроводов, вследствие чего имеет место неравномерное распределение тока между отдельными щетками.

См. п. 1-1-1, К.

1-5. ПЕРЕГРЕВ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

1-5-1. Все катушки полюсов равномерно нагреваются выше нормы; двигатель при нормальном напряжении сети вращается слишком медленно.

Слишком велик ток возбуждения; добавочное сопротивление в цепи возбуждения параллельной обмотки мало или совершенно отсутствует. Возможно, что при ремонте катушки полюсов соединили не последовательно, а параллельно (редко встречающийся случай).

Отрегулировать добавочное сопротивление так, чтобы при номинальной нагрузке и номинальном напряжении частота вращения двигателя соответствовала указанной на заводском щитке машины.

Проверить правильность соединения катушек.

1-5-2. Все катушки нагреваются равномерно; генератор при номинальной частоте вращения дает слишком высокое напряжение.

Слишком велик ток возбуждения. Регулятор возбуждения неисправен или не соответствует машине.

Проверить исправность регулятора возбуждения. Если неисправностей в нем не обнаружено, то заменить регулятор другим, с бóльшим сопротивлением.

1-5-3. Некоторые катушки сильно нагреваются; часть катушек остается холодной. Щетки искрят. Якорь нагревается.

А. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких катушках полюсов.* Ток возбуждения увеличивается вследствие уменьшения сопротивления обмотки возбуждения от короткого замыкания в неисправных катушках.

См. п. 1-1-6, Б.

Б. *Соединение параллельной обмотки с обмоткой добавочных полюсов или с последовательной обмоткой.* Вследствие этого часть катушек шунтируется и ток возбуждения увеличивается.

Отключить концы параллельной и последовательной обмоток и определить при помощи контрольной лампы или мегомметра место повреждения. Если это место легко доступно, то заизолировать его; в противном случае перемотать неисправную катушку или заменить ее новой.

1-6. НЕНОРМАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА

1-6-1. Генератор не возбуждается. Магнитная стрелка, поднесенная к полюсным башмакам, не указывает определенную полярность (одним и тем же полюсом машины притягивается как северный, так и южный конец стрелки).

Генератор потерял остаточный магнетизм.

Вновь намагнитить машину от постороннего источника тока (аккумуляторная батарея, общий распределительный щит или другая машина). Для сохранения правильной полярности машины пропустить намагничивающий ток через параллельную обмотку возбуждения в направлении, соответствующем нормальной работе генератора (см. приложение 6).

Включать и выключать ток через реостат во избежание возможного пробоя изоляции обмотки.

1-6-2. Магнитная стрелка, поднесенная к полюсным башмакам, показывает правильную полярность машины, но (даже после намагничивания машины) генератор не возбуждается.

А. *Неправильное положение щеток.* При монтаже новых машин, отправленных с завода в разобранном виде, а также при сборке машин, разбиравшихся для ревизии или ремонта, щеткодержатели иногда устанавливаются неправильно, в обратную сторону, вследствие чего щетки, несмотря на то что траверса установлена по заводским меткам, далеко сдвинуты с нейтрали.

Проверить нейтраль и правильно установить щетки по заводским меткам (см. приложение 4).

Б. *Направление вращения машины выбрано неправильно, или параллельная обмотка неправильно соединена с якорем.*

Вследствие этого действие самовозбуждения машины противоположно действию остаточного магнетизма.

Переменить направление вращения или, в случае неправильного соединения, соединить параллельную обмотку с якорем соответственно направлению вращения по приложенной к машине схеме, а при отсутствии последней — по нормальной схеме (см. приложение 1).

В. *Параллельная обмотка возбуждения заземлена в двух местах.*

Устранить заземления.

Г. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких катушках возбуждения.*

См. п. 1-1-6, Б.

Д. *Короткое замыкание в обмотке якоря, между пластинами или петушками коллектора.*

См. п. 1-3-6, А—В.

Е. *Обрыв или плохой контакт в обмотке якоря.*

См. п. 1-1-8, А.

Ж. *Регулятор возбуждения неправильно присоединен к машине.*

Проверить и исправить по заводской схеме соединение регулятора возбуждения с генератором (см. приложение 1).

З. *Обрыв или плохой контакт в цепи возбуждения. Сопротивление цепи возбуждения слишком велико (выше критического).* Неисправность наблюдается большей частью в регуляторе возбуждения, редко в обмотке машины. Часто причиной служит загрязнение контактов регулятора.

Найти место обрыва или плохого контакта (см. приложение 8) и исправить повреждение. При обрыве в обмотке перемотать неисправную катушку или заменить ее новой. В случае увеличенного сопротивления цепи возбуждения уменьшить значение нерегулируемой части сопротивления в цепи возбуждения.

Просмотреть и прочистить контакты регулятора возбуждения.

И. См. п. 1-5-3, Б.

1-6-3. Генератор возбуждается только при сильном нажатии щеток.

А. *Слишком велико переходное сопротивление между коллектором и щетками вследствие загрязнения.*

См. пп. 1-1-14 и 1-1-15.

Б. См. п. 1-1-10, Б.

В. См. п. 1-1-1, Е.

1-6-4. Генератор дает напряжение ниже номинального.

А. *Частота вращения генератора ниже номинальной.*

Проверить частоту вращения первичного двигателя и правильность подбора шкивов при ременной передаче.

Б. См. п. 1-1-1, А.

В. См. п. 1-6-2, З.

Г. *Отдельные катушки полюсов неправильно соединены между собой.*

Проверить полярность главных полюсов (см. приложение 2).

Д. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких катушках параллельной обмотки возбуждения.*

См. п. 1-1-6, Б.

1-6-5. Генератор при холостом ходе дает нормальное напряжение; при нагрузке генератора напряжение его сильно падает.

А. *Понижается частота вращения первичного двигателя, или имеет место повышенное скольжение приводного ремня.* Если первичным двигателем служит асинхронный двигатель, то неисправность его (см. пп. 2-7-8—2-7-10) может быть причиной понижения частоты вращения.

Устранить причины понижения частоты вращения первичного двигателя при нагрузке или увеличения скольжения ремня. Проверить цепь ротора асинхроиного двигателя (см. пп. 2-7-8—2-7-10).

Б. *Неправильная полярность добавочных полюсов,* т. е. неправильное чередование главных и добавочных полюсов. Такая неисправность, так же как и неправильное включение последовательной обмотки, вызывает сильное падение напряжения при нагрузке и обычно сопровождается сильным искрением щеток.

Проверить полярность добавочных полюсов (см. приложение 2).

В. *У генератора смешанного возбуждения последовательная обмотка включена неправильно.* Действие магнитного поля последовательной обмотки противоположно действию поля параллельной обмотки.

Поменять местами выводные концы последовательной обмотки. Проверить полярность полюсов: а) при включении одной параллельной обмотки; б) при включении одной последовательной обмотки (см. приложение 2).

1-6-6. Отключенный от сети генератор дает нормальное напряжение; щетки не искрят. При включении генератора в сеть напряжение падает, несмотря на нормальную частоту вращения генератора. Падение напряжения обычно сопровождается искрением щеток.

Параллельная обмотка или регулятор возбуждения соединены с корпусом. Если сеть одним полюсом постоянно заземлена или из-за какой-либо неисправности имеет случайное заземление, то параллельная обмотка шунтируется и происходит ослабление поля.

Отыскать место заземления параллельной обмотки или регулятора возбуждения (см. приложение 8) и устранить его. Если заземление произошло внутри катушки, то перемотать ее или заменить новой.

1-6-7. Генератор дает повышенное напряжение при холостом ходе и при нагрузке. Других неисправностей в машине не обнаружено.

А. *Частота вращения выше номинальной.*

Установить номинальную частоту вращения.

Б. *Недостаточно сопротивление регулятора возбуждения.*

Включить в цепь возбуждения генератора последовательно с имеющимся регулятором постоянное добавочное сопротивление или заменить регулятор другим, с бо́льшим сопротивлением.

В. *Катушки полюсов соединены не последовательно, а параллельно (редко встречающийся случай).*

Если возникло сомнение в правильности соединения катушек, запросить завод-изготовитель.

1-6-8. Отключенный от сети генератор дает нормальное напряжение; регулятор возбуждения действует правильно; при включении генератора на сеть напряжение повышается; передвижение рукоятки регулятора возбуждения не вызывает изменения напряжения. В некоторых случаях бездействующей оказывается только часть регулятора, в других случаях он весь не действует.

Регулятор замкнулся на корпус, или же заземлен провод, соединяющий регулятор с параллельной обмоткой генератора. Если сеть соединена с землей (случайно или намеренно), то регулятор частично или весь шунтируется, ток возбуждения генератора вследствие этого увеличивается и напряжение повышается.

Отыскать место замыкания на землю и устранить последнее (см. приложение 8).

1-7. НЕРАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ И НЕУСТОЙЧИВАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ

1-7-1. У параллельно работающих генераторов параллельного возбуждения при изменениях нагрузки последняя распределяется неравномерно и несоответственно мощности генераторов.

При пиковых нагрузках один из генераторов принимает на себя бо́льшую часть нагрузки.

Неодинаковы внешние характеристики генераторов (поразному изменяется напряжение при изменении нагрузки), или различно изменение частоты вращения их первичных двигателей.

Чтобы автоматически равномерно и соответственно мощностям распределялась нагрузка между генераторами параллельного возбуждения, напряжение генераторов должно одинаково изменяться, а у их первичных двигателей должно быть одинаковое относительное снижение частоты вращения между холостым ходом и работой на номинальной нагрузке. Если же эти условия не соблюдены, то равномерное распределение нагрузки между генераторами достигается соответствующей регулировкой их возбуждения.

Автоматическое равномерное распределение нагрузки между генераторами, имеющими неодинаковые внешние характеристики, можно получить за счет либо увеличения падения напряжения генератора, принимающего на себя бо́льшую часть нагрузки, либо уменьшения падения напряжения второго генератора. Этого можно достигнуть незначительным передвижением траверсы, если при этом не возникает недопустимое искрение щеток. При сдвиге щеток по направлению вращения якоря падение напряжения генератора увеличивается, а при сдвиге щеток против направления вращения — уменьшается.

Если сдвигом щеток не удается достигнуть равномерного распределения нагрузки, то в качестве временной меры в цепь генератора с меньшим падением напряжения можно включить небольшое добавочное сопротивление (оно снижает КПД установки).

Радикальным средством равномерного распределения нагрузки является регулировка зазора между якорями и главными полюсами генераторов, а также применение уравнительной обмотки.

1-7-2. В двухколлекторных машинах распределение нагрузки без видимых причин изменяется во время работы; чистка одного из коллекторов часто вызывает изменение распределения нагрузки.

Неодинаково переходное сопротивление между коллектором и щетками или в контактах токоподводящей и токособирательной систем.

Применять на обоих коллекторах щетки только одной марки. Все токопроводы распределить таким образом,

чтобы сопротивление их в цепи обоих коллекторов было одинаковым.

Проверить все контакты токопроводящей и токособирательной систем (см. п. 1-1-1, К). Чистку обоих коллекторов производить одновременно.

Для достижения равномерного распределения нагрузки в цепь одного из коллекторов в некоторых случаях включают небольшое регулируемое сопротивление, что нежелательно из-за повышения потерь.

Разница в токах обоих коллекторов, не превышающая 10 %, является допустимой.

1-7-3. При параллельной работе генераторов смешанного возбуждения наблюдаются сильные колебания нагрузки отдельных генераторов; часто происходит перемагничивание одного из генераторов, сопровождаемое сильным искрением щеток (см. также п. 1-8-2).

Отсутствует уравнительный провод между последовательными обмотками генераторов. Без уравнительного провода устойчивая параллельная работа генераторов смешанного возбуждения невозможна.

Поставить уравнительный провод (рис. 1-1) достаточного сечения. Чтобы обеспечить надежную параллель-

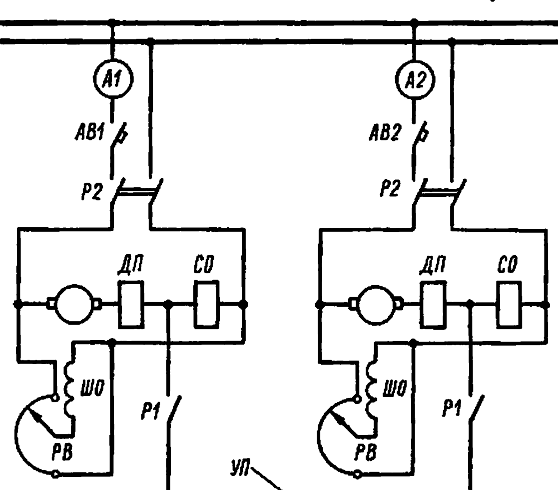


Рис. 1-1. Схема параллельного включения генераторов смешанного возбуждения с уравнительным проводом

А1, А2 — амперметры; *Р1, Р2* — рубильники; *РВ* — регулятор возбуждения; *АВ1, АВ2* — автоматические выключатели; *ДП* — обмотка добавочных полюсов; *ШО* — параллельная обмотка возбуждения; *СО* — последовательная обмотка возбуждения; *УП* — уравнительный провод

ную работу генераторов, сопротивление уравнительного провода должно быть меньше суммы сопротивлений последовательных обмоток обоих генераторов, еще лучше, если оно будет меньше сопротивления последовательной обмотки каждого из генераторов. При несоблюдении этого условия параллельная работа генераторов, даже при наличии уравнительного провода, не будет устойчивой и будет происходить перемагничивание генераторов.

Соединения должны быть выполнены по схеме рис. 1-1. Амперметры *A1* и *A2* и автоматические выключатели *AB1* и *AB2* (если они имеются) должны быть включены так, как указано на рисунке. При включении их в один провод с последовательной обмоткой нельзя определить неравномерность распределения нагрузки между генераторами, так как по уравнительному проводу могут проходить уравнительные токи; кроме того, при выключении одного из автоматических выключателей отключенный генератор будет продолжать работать двигателем.

При параллельном включении генераторов сначала включают рубильники *P1*, а затем *P2*; выключение производят в обратном порядке, т. е. выключают рубильники *P2*, а затем рубильники *P1*.

Во избежание неправильных манипуляций при включении и выключении генераторов можно вместо однополюсных рубильников *P1* и двухполюсных рубильников *P2* поставить трехполюсные.

Кроме того, можно включить небольшое сопротивление параллельно последовательной обмотке генератора, принимающего на себя бóльшую часть нагрузки, т. е. несколько ослабить действие этой обмотки.

1-7-4. Нагрузка генератора колеблется, причем других неисправностей в генераторе не обнаружено.

А. *Если колебания нагрузки не зависят от потребителя, то причиной их являются неисправности первичного двигателя или неравномерное скольжение приводного ремня.* Когда первичным двигателем является асинхронный двигатель, то неисправность его ротора может вызвать колебания нагрузки (см. п. 2-7-9).

Устранить неисправность первичного двигателя или неравномерное скольжение ремня.

Б. *Плохой контакт в цепи возбуждения генератора.*

Проверить цепь возбуждения генератора (см. приложение 8).

1-8. САМОРАЗМАГНИЧИВАНИЕ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА

1-8-1. Генератор параллельного возбуждения не возбуждается, или изменилась полярность щеток.

Генератор размагнитился или намагнитился в другом направлении (перемагнитился). Это может быть, когда щетки сдвинуты с нейтрали вперед по направлению вращения машины, вследствие чего обмотка якоря создает продольно действующую МДС, ослабляющую основное поле, создаваемое параллельной обмоткой. Если внешняя цепь машины обладает большой самоиндукцией (например, у возбудителей синхронных генераторов), то при быстром уменьшении тока возбуждения параллельной обмотки вследствие слишком быстрого передвижения рукоятки регулятора возбуждения в сторону увеличения сопротивления или из-за плохого контакта в цепи параллельной обмотки может случиться, что ток в якоре будет убывать медленнее, чем ток возбуждения. Вследствие этого результирующая МДС может переменить свой знак и машина либо размагнитится, либо намагнитится в другом направлении (перемагнитится). В последнем случае изменится полярность щеток.

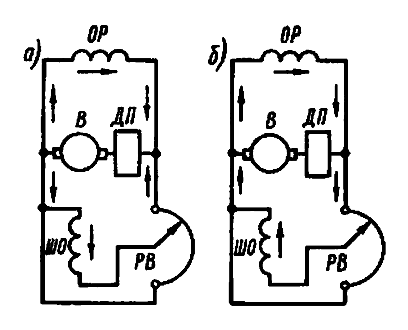
Наличие добавочных полюсов приводит к тому, что при сдвиге щеток с нейтрали в направлении вращения усиливается размагничивание машины.

Отдельно работающие генераторы при размагничивании или перемагничивании теряют напряжение или изменяется полярность щеток без особых внешних признаков. У параллельно работающих генераторов размагничивание и перемагничивание сопровождается сильным искрением щеток, а в некоторых случаях даже круговым огнем (см. п. 1-1-16).

Перемагничивание возбудителей синхронных генераторов при быстром изменении силы тока в параллельной обмотке возбудителя легко объяснить влиянием магнитной энергии ротора, если проследить за направлением тока по рис. 1-2. Направление тока при нормальной работе возбудителя указано на рис. 1-2, *а*. При слишком быстром передвижении рукоятки регулятора возбуждения в сторону повышения его сопротивления или при размыкании и быстром обратном замыкании цепи параллельной обмотки (например, вследствие плохого контакта в регуляторе) напряжение возбудителя и ток в его параллельной обмотке быстро падают, вследствие чего должен понизиться и ток в роторе генератора. Однако уменьшающееся поле генератора наводит в обмотке его ротора экстратоки, стремящиеся поддержать значение тока в нем, и ротор при этом из потребителя превращается в источник тока. Таким образом, может полу-

Рис. 1-2. Перемагничивание возбудителя: *а* — направление тока при нормальной работе возбудителя; *б* — направление тока при перемагничивании

В — возбудитель; *ОР* — обмотка ротора генератора; *ДП* — обмотка добавочных полюсов; *ШО* — обмотка возбуждения возбудителя; *РВ* — регулятор возбуждения



чится новое направление тока, как указано на рис. 1-2, *б*. По отношению к параллельной обмотке этот ток имеет обратное нормальному направление, и возбудитель вследствие этого перемагничивается.

Перемагничивание возбудителя может произойти также при внезапном коротком замыкании генератора. И в этом случае исчезающее поле генератора будет поддерживаться экстратоками, наводимыми в роторной обмотке, обращающими ротор в источник тока совершенно аналогично рассмотренному выше случаю; поэтому и здесь получается такое же распределение тока, как указано на рис. 1-2, *б*.

Искрение щеток возбудителя также может послужить причиной его перемагничивания. Внезапное усиление искрения эквивалентно введению большого сопротивления в цепь якоря, вследствие чего часть тока ротора генератора ответвляется в параллельную обмотку возбудителя и происходит перемагничивание, как указано на рис. 1-2, *б*.

Вновь намагнитить генератор от постороннего источника тока с соблюдением правильной полярности (см. приложение 6).

Поставить щетки на нейтраль (см. приложение 4) В тех случаях, когда размагничивание происходит и при этом положении щеток, следует сдвинуть щетки на 1—2 коллекторные пластины против направления вращения машины, если такой сдвиг щеток не нарушает коммутации и не вызывает искрения щеток.

Избегать слишком быстрого увеличения сопротивления регулятора возбуждения, т. е. слишком быстрого передвижения его рукоятки при снижении напряжения генератора.

Проверить исправное состояние всех контактов в цепи параллельной обмотки и регулятора напряжения (см. п. 1-6-2, 3).

Намотать на главные полюсы генератора вспомога-

тельную последовательную обмотку, усиливающую действие параллельной обмотки. Намотать на главные полюсы генератора по одному короткозамкнутому витку из красной меди достаточно большого сечения с тем, чтобы сопротивление витка было возможно меньшим.

1-8-2. Генератор смешанного возбуждения изменил полярность щеток.

А. *Отсутствует уравнительный провод между последовательными обмотками параллельно работающих генераторов* (см. п. 1-7-3).

Поставить уравнительный провод (см. п. 1-7-3). Вновь намагнитить генератор от постороннего источника тока с соблюдением правильной полярности (см. приложение 6).

Б. *Через последовательную обмотку генератора прошел ток обратного направления (например, при разрядке аккумуляторной батареи).*

Поставить в цепь якоря автоматический выключатель обратного тока. Вновь намагнитить генератор.

1-9. НЕНОРМАЛЬНАЯ ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

1-9-1. Двигатель не идет в ход. В якоре нет тока при включенном пусковом реостате.

А. *Перегорели предохранители.*

Поставить новые предохранители.

Б. *Произошел обрыв в пусковом реостате или в проводах.*

Найти при помощи контрольной лампы или мегомметра поврежденное место и устранить обрыв.

В. *Обрыв в обмотке якоря.*

См. п. 1-1-9.

1-9-2. Ток в якоре имеется. Двигатель с нагрузкой не идет в ход. Без нагрузки, развернутый от руки двигатель развивает очень большую частоту вращения и может «понести».

А. *Отсутствие или ослабление поля.*

См. п. 1-6-2, 3.

Б. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких катушках параллельного возбуждения.*

См. п. 1-1-6, Б.

В. См. п. 1-6-4, Г.

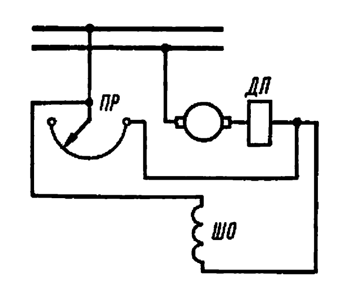
Г. *Параллельная обмотка возбуждения соединена с корпусом или с другими обмотками, вследствие чего она частично или полностью шунтируется.*

См. п. 1-5-3, Б.

Д. *Параллельная обмотка возбуждения неправильно сое-*

Рис. 1-3. Неправильное соединение параллельной обмотки возбуждения с двигателем и пусковым реостатом

ПР — пусковой реостат; *ДП* — обмотка добавочных полюсов; *ШО* — обмотка возбуждения



динена с двигателем и пусковым реостатом, вследствие чего обмотка возбуждения подключена к линии одной полярности (рис. 1-3).

Правильно соединить параллельную обмотку возбуждения — согласно рис. 1-5.

1-9-3. Двигатель идет в ход только вхолостую; с нагрузкой в ход не идет. После установки щетки пускового реостата на последний контакт (рабочее положение) двигатель работает нормально.

Параллельная обмотка возбуждения присоединена неправильно — после пускового реостата (рис. 1-4). Вследствие этого параллельная обмотка возбуждения во время пуска двигателя получает очень небольшой ток, полюсы слабо намагничиваются и двигатель не может развить достаточный пусковой момент. По мере уменьшения сопротивления пускового реостата ток в параллельной обмотке возбуждения увеличивается, и после установки щетки реостата на последний контакт двигатель работает нормально.

При пусковом реостате с двумя зажимами присоединить параллельную обмотку возбуждения согласно рис. 1-5.

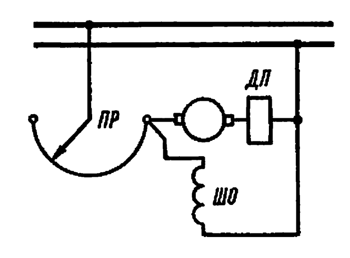


Рис. 1-4. Неправильное соединение параллельной обмотки возбуждения двигателя

Обозначения — см. рис. 1-3

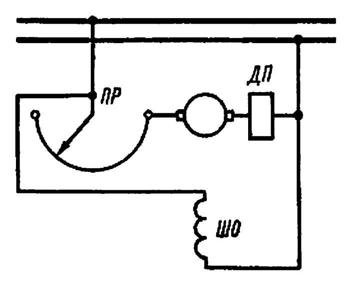


Рис. 1-5. Правильное соединение параллельной обмотки возбуждения двигателя

Обозначения — см. рис. 1-3

1-9-4. Ток в якоре и параллельной обмотке возбуждения имеется. Двигатель не идет в ход или работает с сильно пониженной частотой вращения. Щетки сильно искрят.

А. *Обрыв или плохой контакт в обмотке якоря.*

См. пп. 1-1-8, А и 1-1-9.

Б. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в якоре.*

См. п. 1-1-2, А, Б и приложение 8.

1-9-5. Частота вращения двигателя при номинальном напряжении превышает номинальную. Двигатель смешанного возбуждения развивает, кроме того, пониженный пусковой момент.

А. *Щетки сдвинуты с нейтрали против направления вращения двигателя.*

Поставить щетки на нейтраль (см. приложение 4).

Б. *Сопротивление регулятора возбуждения слишком велико.*

Уменьшить сопротивление регулятора возбуждения, а в случае надобности совершенно выключить его.

В. *Междувитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких параллельных катушках возбуждения.*

См. п. 1-1-6, Б.

Г. *У двигателя смешанного возбуждения последовательная обмотка включена противоположно параллельной.*

См. п. 1-6-5, В.

1-9-6. Частота вращения двигателя при номинальном напряжении меньше номинальной.

А. *Щетки сдвинуты с нейтрали по направлению вращения двигателя.*

Поставить щетки на нейтраль (см. приложение 4).

Б. *Сопротивление регулятора возбуждения слишком мало.*

Увеличить сопротивление регулятора возбуждения.

В. См. п. 1-6-7, В.

1-9-7. Двигатель «качает». Он хорошо идет в ход и спокойно работает при небольшой нагрузке, но при увеличении нагрузки и ослаблении поля (для регулировки частоты вращения) начинает «качаться», т. е. происходят сильные колебания силы тока и частоты вращения. Если двигатель вовремя не выключить, то он может «понести» и сила тока может достигнуть опасного для двигателя значения.

А. *Двигатель работает с сильно ослабленным полем (пример — двигатель с регулировкой частоты вращения). При повышении нагрузки вследствие реакции якоря повышается также и частота вращения.*

В большинстве случаев «качание» двигателя можно устранить, сдвинув щетки с нейтрали по направлению вращения. Если по условиям коммутации нельзя сдвинуть

щетки до положения, необходимого для устойчивой работы, то можно надежно устранить «качание» двигателя, намотав на главные полюсы небольшую вспомогательную последовательную обмотку, усиливающую поле. В большинстве случаев достаточно намотать на каждый полюс по 2—3 витка (в крупных машинах — по 1 витку).

Если такие двигатели смешанного возбуждения работают как реверсивные, то одновременно с переменой направления вращения необходимо переключать и последовательную обмотку (см. приложение 1).

Б. *Щетки сдвинуты с нейтрали против направления вращения двигателя или прилегают к коллектору только набегающим краем.*

См. пп. 1-9-7, А и 1-1-1, В.

В. *Последовательная обмотка включена противоположно параллельной.*

См. п. 1-6-5, В.

ГЛАВА ВТОРАЯ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

2-1. ИСКРЕНИЕ ЩЕТОК И ОБГОРАНИЕ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ

Щетки искрят; некоторые щетки и их арматура сильно нагреваются и обгорают.

А. *Щетки плохо пришлифованы.*

Пришлифовать щетки к контактным кольцам стеклянной шкуркой. Применять для шлифовки щеток наждачную бумагу нельзя (см. приложение 4).

Б. *Щетки не могут свободно двигаться в обойме щеткодержателя, что ухудшает контакт между контактными кольцами и щетками.*

Поставить щетки такого размера, чтобы они свободно передвигались и не зажимались в обойме щеткодержателя; в случае надобности припилить и пришлифовать щетки. Нормальный зазор между щеткой и обоймой составляет 0,2—0,3 мм.

В. *Контактные кольца и щетки загрязнены.* Иногда причиной загрязнения служит попадание масла из подшипника.

Очистить контактные кольца и щетки от грязи и про-

тереть их чистой неволокнистой тряпкой, слегка смоченной бензином. Устранить причины попадания масла из подшипника (см. пп. 4-4-2, 4-4-3, 4-5-2).

Г. *Контактные кольца имеют неровную поверхность или бьют.*

Отшлифовать или обточить контактные кольца (см. приложение 4).

Д. *Щетки слабо прижаты к контактным кольцам.*

Отрегулировать нажатие щеток по заводским нормам (см. приложение 4).

Е. *Поставлены щетки неподходящей марки.*

Поставить щетки, предписанные заводом, или подобрать щетки соответствующей марки (см. приложение 5).

Ж. *Ток неравномерно распределяется между отдельными щетками.* Это может быть из-за плохого контакта в цепи щеткодержателей и токоподводов, неодинакового нажатия щеток или применения щеток различных марок.

Проверить и исправить все контакты траверсы, токоподводов, щеткодержателей и щеток. Отрегулировать равномерное нажатие щеток соответственно применяемой марке щеток (см. приложение 5). Применять щетки только одной марки. В случае невозможности получения одинаковых щеток для всей машины, распределить щетки таким образом, чтобы на каждом кольце были поставлены щетки только одной марки (см. приложение 4).

2-2. ПЕРЕГРЕВ МАШИНЫ

См. § 1-2.

2-3. ПЕРЕГРЕВ АКТИВНОЙ СТАЛИ СТАТОРА

2-3-1. Активная сталь статора равномерно перегрета, хотя нагрузка двигателя не превышает номинальной.

Напряжение сети выше номинального.

Снизить напряжение сети до номинального. Если это невозможно, то усилить вентиляцию двигателя, запросив завод-изготовитель о способах ее усиления. Если и после усиления вентиляции перегрев стали будет выше допустимого и возникнет опасение за бесперебойную работу двигателя, то заменить двигатель другим, соответствующим напряжению сети. См. также п. 2-4-1, В.

2-3-2. Наблюдается повышенный местный нагрев активной стали при холостом ходе двигателя и номинальном напряжении сети.

А. *Между отдельными листами активной стали имеются местные замыкания, вызванные заусенцами, образовавшимися при опиловке, или же из-за задевания ротора о статор во время работы двигателя.*

Удалить заусенцы; обработать места замыкания острым напильником; разъединить соединительные листы стали и пролакировать их изоляционным лаком воздушной сушки (см. также п. 2-3-2, В).

Б. *Произошло соединение между стяжными болтами и активной сталью (в машинах старой конструкции).*

Исправить изоляцию стяжных болтов или заменить поврежденные болты новыми; в большинстве случаев для этого необходимо произвести частичную или полную перемотку обмотки статора.

В. *Зубцы активной стали в отдельных местах выгорели и оплавились вследствие коротких замыканий в обмотке статора или пробоя обмотки на корпус.*

Вырубить или вырезать поврежденные места. Между отдельными листами проложить тонкий электрокартон или пластинки слюды и пролакировать их изоляционным лаком. Такой способ ремонта обычно дает хорошие результаты при тщательном изолировании друг от друга отдельных листов стали для предотвращения образования новых внутренних замыканий. При большом числе повреждений стали необходимо произвести полную перешихтовку ее, что связано с перемоткой статора. До укладки обмотки необходимо исправленную активную сталь статора испытать на отсутствие замыканий между листами. Испытание проводится с помощью намагничивающей обмотки, питаемой однофазным током при индукции в стали, равной 1 Тл (см. приложение 10, разд. Ж). Отсутствие местных перегревов в стали свидетельствует об удовлетворительном ремонте.

2-4. ПЕРЕГРЕВ ОБМОТКИ СТАТОРА

2-4-1. Наблюдается общий равномерный перегрев всей обмотки статора.

А. *Двигатель перегружен, или нарушена его нормальная вентиляция.*

См. § 1-2.

Б. *Напряжение на зажимах двигателя ниже номинального, вследствие чего двигатель при номинальной мощности перегружен током.*

Повысить напряжение до номинального или уменьшить нагрузку до номинальной силы тока.

В. *Обмотка статора соединена не звездой, а треугольником.*

Соединить обмотку статора звездой.

2-4-2. Обмотка статора местами сильно нагревается. Сила тока в отдельных фазах неодинакова. Двигатель сильно гудит и развивает пониженный крутящий момент.

А. *Междувитковое соединение в обмотке статора.*

См. приложение 8, разд. Б.

Б. *Неправильно соединены катушки одной фазы; одна или несколько катушек «перевернуты».*

См. п. 2-7-12, А.

В. *Обмотка одной фазы замкнута на землю в двух местах.*

Найти при помощи мегомметра или контрольной лампы место замыкания обмотки на землю (см. приложение 8) и устранить это замыкание; в случае надобности перемотать поврежденные катушки.

Г. *Короткое замыкание между двумя фазами.*

Найти место короткого замыкания (см. приложение 8). Поврежденное место отремонтировать или же перемотать поврежденную часть обмотки.

2-5. ПЕРЕГРЕВ ОБМОТКИ РОТОРА

2-5-1. Вся обмотка ротора равномерно перегрета. У двигателя пониженная частота вращения. Других неисправностей не обнаружено.

См. § 1-2 и п. 2-4-1, Б.

2-5-2. Ротор, а иногда и статор перегреваются. Двигатель гудит, ток в статоре сильно пульсирует. Двигатель с нагрузкой плохо идет в ход и не развивает номинальной частоты вращения; момент вращения меньше номинального.

Неисправность вызывается плохим контактом в цепи ротора. В фазном роторе возможны случаи А — Д:

А. *Плохой контакт в пайках лобовых частей обмотки или нулевой точке, в переходных соединениях между стержнями или в соединениях между параллельными группами.*

Тщательно проверить все пайки обмоток ротора; те из них, которые неисправны или внушают подозрение, перепаять. Если наружным осмотром не удается обнаружить место плохой пайки, то при отсутствии неисправностей, указанных в п. 2-5-2, Б — Д, произвести проверку паек обмотки ротора методом падения напряжения (см. приложение 8).

Б. *Плохой контакт в соединениях обмотки с контактными кольцами.*

Проверить контакты токоподводов в местах соединения их с обмоткой и контактными кольцами.

В. *Плохой контакт в щеточном аппарате или же ослабли контакты механизма для короткого замыкания ротора и подъема щеток вследствие механической неисправности, загрязнения или попадания масла.*

См. § 1-2, п. А — Д.

Г. *Плохой контакт в соединениях между контактными кольцами и пусковым реостатом.*

Проверить исправность контактов в местах присоединения соединительных проводов к выводам ротора и пускового реостата.

Д. *Плохой контакт в пусковом реостате,* например, из-за недостаточного прилегания щеток.

Проверить и почистить контакты и щетки пускового реостата.

Е. *Плохой контакт между стержнями короткозамкнутого ротора и короткозамыкающими кольцами из-за отрыва стержней от короткозамыкающих колец или разрыва последних (в одном или нескольких местах).* В некоторых случаях наблюдается разрыв отдельных стержней в пазовой части ротора.

Найти место обрыва (см. приложение 8), перепаять его или заменить лопнувший стержень ротора.

2-5-3. Двигатель с фазным ротором без нагрузки идет в ход при разомкнутой цепи ротора. При пуске в ход с нагрузкой двигатель медленно разворачивается и ротор сильно нагревается.

Короткое замыкание между соседними хомутиками лобовых соединений или в обмотке ротора; заземление обмотки ротора в двух местах.

Тщательно проверить, не касаются ли друг друга соседние хомутики лобовых соединений; если касаются, то разогнуть их. Проверить, нет ли соединения между хомутиками оставшимся после пайки оловом; наплывы олова удалить. Измерить сопротивление изоляции ротора и в случае заземления обмотки или контактных колец устранить его. Нахождение короткого замыкания см. в приложении 8.

После определения короткозамкнутой части обмотки заменить поврежденные катушки (секции) новыми или перемотать их. Не ограничиваться частичной переизолировкой, так как перегрев повреждает в большинстве случаев всю изоляцию короткозамкнутых катушек, что грозит в дальнейшем новыми короткими замыканиями.

2-6. ПЕРЕГРЕВ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ И ЩЕТОК

2-6-1. Контактные кольца и щетки перегреты.

А. *Щетки искрят.*

См. § 2-1.

Б. *Щетки слишком сильно прижаты к контактным кольцам.*

Отрегулировать нажатие соответственно марке щеток (см. приложение 5).

В. *Недостаточна вентиляция контактных колец и щеток* (у двигателей с закрытыми контактными кольцами). Перегрев обычно сопровождается искрением щеток и повышенным износом щеток и колец.

Усилить вентиляцию контактных колец и щеток посредством установки вентилятора или увеличения числа или размеров имеющихся вентиляционных крыльев; увеличить число и размеры вентиляционных отверстий в кожухе. Целесообразно запросить рекомендации завода-изготовителя.

В некоторых случаях полезно прорезать на скользящей поверхности щеток несколько продольных и поперечных канавок глубиной 3 мм и шириной 1 мм, как указано на рис. П7-2. Число надрезов должно соответствовать размерам щеток. Назначение надрезов — усилить вентиляцию и охлаждение щеток, а также удалить вакуум и газы из-под скользящей поверхности щеток.

Иногда целесообразно сделать на кольцах винтовые канавки (см. приложение 4).

2-7. НЕНОРМАЛЬНАЯ ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

2-7-1. Двигатель не идет в ход.

Отсутствует ток в статоре, что может быть из-за перегорания предохранителей или выключения неисправного автоматического выключателя.

Поставить новые предохранители; исправить автоматический выключатель.

2-7-2. Двигатель не идет в ход, при разворачивании от руки работает толчками и ненормально гудит; в одной фазе статора нет тока.

Обрыв в одной фазе сети или внутренний обрыв в обмотке статора при соединении фаз звездой (явления, происходящие в двигателе при внутреннем обрыве обмотки статора и соединении фаз треугольником, описаны в п. 2-7-11).

Если обрыв фазы происходит во время работы двигателя, то последний может продолжать работать с номинальным вращаю-

щим моментом, но частота вращения при этом сильно понижается, а сила тока настолько увеличивается, что при отсутствии надлежащей максимальной защиты может перегореть обмотка статора или ротора.

Проверить вольтметром напряжение на зажимах статора. Если имеется обрыв в одной фазе сети или напряжение во всех трех фазах несимметрично (например, в случае перегорания предохранителя или обрыва в одной фазе первичной обмотки трансформатора), то устранить неисправность сети. Если сеть исправна, то имеется обрыв в обмотке статора (нахождение обрыва в обмотке см. в приложении 8).

2-7-3. Двигатель не идет в ход, несмотря на то, что напряжение на зажимах статора номинальное, а сила тока во всех трех фазах статора одинакова; все три напряжения на кольцах, измеренные при неподвижном разомкнутом роторе, равны (при двухфазном роторе два напряжения между средним и крайними кольцами равны между собой, а напряжение между двумя крайними кольцами больше первых двух в 1,4 раза).

А. *Обрыв в двух (или в трех) фазах пускового реостата или в соединительных проводах между ротором и пусковым реостатом.*

Отыскать при помощи мегомметра или контрольной лампы место обрыва и исправить (см. приложение 8).

Б. *Сильное одностороннее притяжение ротора к статору из-за большой разработки вкладышей подшипников, смещения подшипниковых щитов или подшипниковых стояков.*

2-7-4. При включении двигателя в сеть ротор не вращается — «прилипает»; выведенный из такого состояния, он самостоятельно разворачивается и продолжает нормально работать. Такое явление наблюдается главным образом в короткозамкнутых двигателях.

Неудачно выбраны числа пазов статора и ротора. Особенно сильно проявляется «прилипание» при равенстве чисел пазов статора и ротора. Неудачное соотношение чисел зубцов ведет к резкому снижению начального момента двигателя. См. сноску в п. 2-7-7.

Установить ротор, имеющий иное число пазов.

Чтобы избежать явления «прилипания» и «застревания» (см. п. 2-7-7), заводы-изготовители применяют также скашивание пазов ротора по отношению к пазам статора, т. е. располагают пазы ротора под небольшим углом к оси вала [26].

2-7-5. Двигатель с фазным ротором идет в ход при разомкнутой цепи ротора.

Короткое замыкание в роторе.

См. п. 2-5-3.

Следует отметить, что иногда двигатель идет в ход и при исправной обмотке ротора от вращающего момента, развиваемого от гистерезиса и вихревых токов, а также при наличии широких бандажей на роторе. Вращающий момент двигателя при этом очень мал. В этом случае ничего предпринимать не нужно, так как двигатель вполне исправен.

2-7-6. Двигатель с короткозамкнутым ротором хорошо идет в ход без нагрузки, с нагрузкой в ход не идет.

Нагрузка при пуске велика.

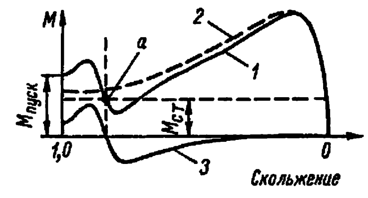
Уменьшить нагрузку при пуске.

2-7-7. Двигатель с короткозамкнутым ротором не достигает нормальной частоты вращения, а «застревает» и начинает устойчиво работать при низкой частоте вращения, которая в несколько раз меньше номинальной (составляет $^1/_7$, $^1/_{11}$, $^1/_{13}$ и т. д. номинальной; знаменатели дробей представляют собой нечетные числа, не делящиеся на 3). Чаще всего это происходит при частоте вращения, составляющей $^1/_7$ номинальной. Однако если ротор принудительно привести во вращение с частотой, превышающей указанное значение, то он разворачивается до номинальной частоты вращения и продолжает нормально работать.

Отклонение формы кривой распределения магнитной индукции в зазоре от синусоиды. Основной причиной этих отклонений является неправильное сочетание чисел пазов статора и ротора для данного числа полюсов. При этом в кривой магнитной индукции появляются так называемые высшие гармоники индукции 5, 7, 11, 13-го и т. д. порядка (несинусоидальную кривую можно представить состоящей из основной синусоиды — первого порядка и синусоид высшего порядка, имеющих частоты, в 5, 7, 11 и т. д. раз превышающие основную). Указанные гармоники создают поля, вращающиеся в пространстве с частотой вращения, меньшей (в 5, 7, 11 и т. д. раз), чем частота вращения магнитного поля от основной гармоники. Вращающие моменты, создаваемые высшими гармониками, искажая форму кривой момента, могут оказать тормозящее действие на двигатель при его разгоне.

На рис. 2-1 показана кривая *1* изменения вращающего момента двигателя при наличии 7-й гармоники индукции; в кривой появляется провал. Если величина этого провала настолько велика, что пусковой вращающий момент $M_{пуск}$, развиваемый двигателем, окажется недостаточным для преодоления статического момента нагрузки $M_{ст}$ в процессе разгона, то, достигнув

Рис. 2-1. Кривая момента *М* асинхронного двигателя в зависимости от скольжения при наличии высших гармоник



точки *а*, двигатель начнет устойчиво работать с частотой вращения, примерно равной $^1/_7$ номинальной.

Кривая *2* на рис. 2-1 соответствует нормальному вращающему моменту, когда отсутствуют высшие гармоники в кривой магнитной индукции.

Заменить ротор другим либо устранить 7-ю гармонику индукции, перемотав обмотку статора, для чего применить двухслойную обмотку с сокращенным шагом (порядка $^6/_7$). Кривая *3* соответствует моменту 7-й гармоники индукции [1].

2-7-8. При номинальной нагрузке двигатель вращается с частотой, не достигающей номинальной.

А. *Напряжение на зажимах двигателя понижено.*

Повысить напряжение до номинального или, если это невозможно, уменьшить нагрузку во избежание перегрева двигателя.

Б. *Плохой контакт в цепи ротора.*

См. п. 2-5-2.

В. *Велико сопротивление в цепи ротора* (длинные или тонкие провода между ротором и пусковым реостатом, невыведенный или неисправный реостат и т. п.).

Увеличить сечение проводов; исправить реостат; перенести пусковой реостат ближе к двигателю.

Г. *Обмотка статора вместо треугольника соединена звездой.*

Соединить обмотку статора треугольником.

2-7-9. Частота вращения ротора ниже номинальной и сильно колеблется даже при небольшой нагрузке двигателя; ток в статоре сильно пульсирует.

---

[1] Следует отметить, что заводы-изготовители принимают меры для предотвращения явлений «застревания» и «прилипания» (см. п. 2-7-4), а также шумов (см. п. 2-9-3). Поэтому в машинах заводского изготовления эти явления весьма редки. Все они наблюдаются главным образом в тех случаях, когда для изменения номинальной частоты вращения обмотку статора перематывали на соответственно другое число полюсов, при этом соотношение чисел пазов статора и ротора оказалось неблагоприятным. С этим же явлением можно встретиться при замене ротора другим, взятым от другой машины.

Плохой контакт в цепи ротора.

См. п. 2-5-2.

2-7-10. Двигатель работает устойчиво при половинной номинальной частоте вращения и сильно гудит, особенно при пуске. Будучи развернут до номинальной частоты вращения, он продолжает работать нормально, но при повышении нагрузки частота вращения вновь падает до половины номинальной.

Обрыв в одной фазе ротора. Обрыв может быть в обмотке ротора, в щеточном аппарате, в пусковом реостате или в соединениях между ротором и пусковым реостатом.

Определить при помощи мегомметра или контрольной лампы место обрыва и устранить его (см. приложение 8).

2-7-11. Двигатель хорошо идет в ход и хорошо работает с номинальной нагрузкой, но сила тока в фазах различна (в одной фазе на 73 % больше, чем в двух других фазах) и частота вращения ротора ниже номинальной. Обмотка одной фазы статора остается холодной.

Внутренний обрыв в одной фазе обмотки статора при соединении фаз треугольником. Вследствие этого получается открытый треугольник и двигатель хорошо идет в ход. Но так как работают только две фазы, то мощность двигателя понижается на $^1/_3$. Нагревание двигателя при этом зависит от нагрузки и может остаться в пределах нормы (явления, происходящие в двигателе при внутреннем обрыве обмотки статора и соединении фаз звездой см. в п. 2-7-2).

Найти место обрыва (см. приложение 8); если оно внутри катушки, то заменить последнюю новой или перемотать ее.

2-7-12. Двигатель плохо идет в ход и сильно гудит; сила тока во всех трех фазах различна и при холостом ходе двигателя превышает номинальную.

А. *Одна фаза обмотки статора «перевернута»* (рис. 2-2 и 2-3). Это большей частью случается у двигателей, имеющих шесть выводов обмотки; причина — неправильное соединение между собой выводов на доске зажимов или неправильная маркировка выводов.

Сделать соединения выводов на доске зажимов согласно схеме соединения, приложенной к двигателю, а при отсутствии ее — по буквенным обозначениям выводов обмотки, руководствуясь нормальной схемой, указанной в приложении 1.

Если буквенные обозначения отсутствуют и невозможно проверить схему соединения обмотки, то правильное соединение выводных концов обмотки можно найти по приложению 2.

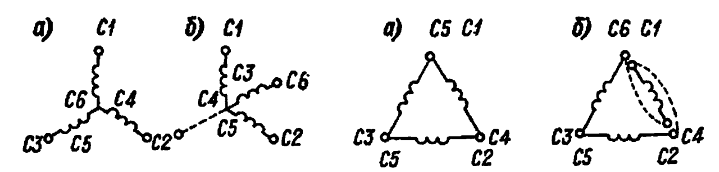


Рис. 2-2. Правильное (*а*) и неправильное (*б*) соединение фаз звездой

Рис. 2-3. Правильное (*а*) и неправильное (*б*) соединение фаз треугольником

Б. *Переключатель неправильно соединен с двигателем.* Это может быть у двигателей с короткозамкнутым ротором, пуск которых производится переключением обмотки статора со звезды на треугольник посредством специального переключателя.

Проверить и правильно соединить переключатель с двигателем.

2-8. ОДНОСТОРОННЕЕ ПРИТЯЖЕНИЕ РОТОРА

Во время работы двигателя происходит задевание ротора за статор.

А. *Нарушена правильность зазора между статором и ротором вследствие износа вкладышей подшипников, смещения подшипниковых щитов, неправильной установки подшипниковых стояков, деформации стали статора или ротора, изгиба вала.*

Проверить зазор между шейками и вкладышами (нормальные зазоры см. в приложении 12) и в случае надобности перезалить вкладыши или заменить их новыми; выверить зазор между ротором и статором (см. приложение 12 и пояснения в п. 2-9-2); при отсутствии установочных штифтов в подшипниковых стояках поставить их; при деформации стали статора опилить ее острым напильником, избегая, однако, при этом образования заусенцев (см. также п. 2-3-2, А и В); при деформации стали ротора обточить его или отшлифовать наждачным кругом; проверить вал (см. приложение 12).

Б. *Ротор плохо отбалансирован.*

Отбалансировать ротор (см. приложение 14).

В. *Междувитковое соединение и различные короткие замыкания в обмотке статора или неправильное соединение фаз статора* (см. п. 2-7-12). Это нарушает симметрию магнитиого потока, и ротор подвергается одностороннему притяжению. При этом ротор притягивается к стороне статора, противоположной поврежденному месту, так как в последнем магнитный поток будет ослаблен размагничивающим действием короткозамкнутой части обмотки.

Нахождение коротких замыканий см. в приложении 8, правильное соединение обмоток см. в приложениях 1 и 2.

2-9. НЕНОРМАЛЬНЫЙ ШУМ В МАШИНЕ [1]

2-9-1. Двигатель сильно гудит. Сила тока во всех фазах различна. Нагрев обмотки статора неравномерен.

А. *Короткое замыкание в обмотке статора.*

См. п. 1-1-6, Б.

Б. *Обмотки статора соединены неправильно.*

См. п. 2-7-12.

В. *Число витков в отдельных катушках обмотки статора неодинаково.* Гудение наблюдается только в случае наличия параллельных ветвей в обмотке и при соединении фаз треугольником. При последовательном соединении всех катушек и соединении фаз звездой неодинаковое число витков в отдельных катушках не вызывает гудения, только сила тока в отдельных фазах различна.

Отсоединить все три фазы и параллельные ветви друг от друга. Поочередно дать в каждую фазу (при последовательном соединении всех катушек) или в каждую ветвь (при параллельном соединении катушек) переменный ток и измерить вольтметром напряжение на отдельных катушечных группах. На катушечных группах, имеющих меньше витков, напряжение будет меньше, чем на исправных катушечных группах. Наибольшая допустимая разность напряжений на отдельных катушечных группах не должна превышать 5 %.

Испытание допустимо как при вставленном, так и при вынутом роторе. При вставленном и разомкнутом фазном роторе испытание можно производить при номинальном напряжении. При вынутом роторе или же при вставленном короткозамкнутом роторе напряжение, подведенное к статору, не должно превышать 15—20 % номинального напряжения двигателя.

Можно также произвести проверку числа витков катушек статора, питая двигатель со стороны ротора (при фазном роторе).

2-9-2. Двигатель работает нормально, но слышится гудение низкого тона, отмечена повышенная вибрация. Сила тока во всех трех фазах одинакова.

При наличии параллельных ветвей в обмотке статора катушечные группы в каждой из параллельных ветвей соедине-

[1] Общие причины ненормального шума в машинах см. в § 4-7.

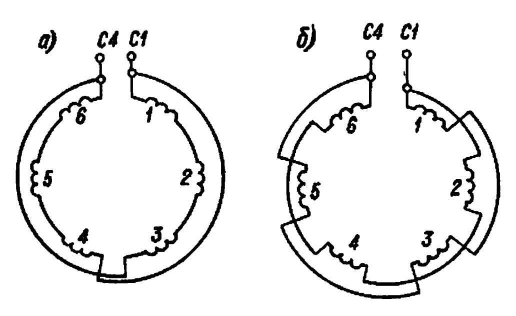


Рис. 2-4. Сосредоточенная (*а*) и распределенная (*б*) схемы соединения катушечных групп одной фазы обмотки статора шестиполюсного трехфазного двигателя при двух параллельных ветвях

ны по сосредоточенной схеме (рис. 2-4, *а*); воздушный зазор между ротором и статором неравномерный.

Тщательно выровнять зазор между ротором и статором (см. приложение 12).

Увеличить зазор на 10—20 %, для чего обточить ротор. Однако нужно иметь в виду, что увеличение зазора ведет к ухудшению коэффициента мощности.

Пересоединить обмотку статора по схеме на рис. 2-4, *б*, распределив катушечные группы каждой параллельной ветви равномерно по всей окружности статора.

В электромагнитном взаимодействии ротора и статора при этих двух вариантах соединения фазы имеется определенное различие. При соединении по схеме 2-4, *а* токи в параллельных ветвях фазы (при неравномерном по окружности воздушном зазоре) разные: бо́льший ток в параллельной ветви, расположенной («сосредоточенной») в области увеличенного зазора (обычно это вверху статора), меньший — в области уменьшенного зазора. В результате имеет место явление периодического магнитного подтягивания ротора с тенденцией выравнивания воздушного зазора и некоторого ослабления давления на подшипники. Это периодическое магнитное взаимодействие и может явиться причиной характерного гудения и повышенной вибрации.

С другой стороны, в практике эксплуатации крупных многополюсных двигателей с подшипниками скольжения для устранения дефекта, описанного в § 2-8, наоборот, пересоединяют схему с варианта 2-4, *б* на вариант 2-4, *а*, если при этом приведенные выше отрицательные явления, связанные со схемой 2-4, *а*, не будут столь существенными.

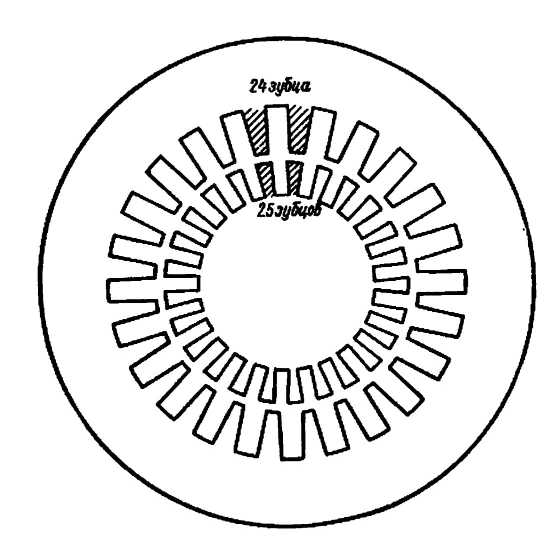


Рис. 2-5. Мгновенное расположение зубцов статора и ротора асинхронного двигателя

2-9-3. Двигатель во время работы издает сильное гудение высокого тона (свист), исчезающее сейчас же после выключения тока. Иногда гудение сопровождается сильной вибрацией.

Вибрация зубцов статора и ротора из-за неудачного выбора соотношения чисел пазов статора и ротора [26]. В момент совпадения осей некоторых зубцов статора и ротора появляется одностороннее притяжение между зубцами статора и ротора. Для иллюстрации этого на рис. 2-5 представлено мгновенное расположение зубцов статора и ротора при 24 зубцах в статоре и 25 зубцах в роторе (зубцы с совпадающими осями заштрихованы). Силы притяжения при вращении ротора перемещаются с большей скоростью и вызывают вибрацию вала ротора. Эти силы при недостаточной жесткости статора могут вызвать также и его вибрацию.

Механические вибрации, происходящие в упругой среде, какой является воздух, и создают звук. Интенсивность последнего зависит от величины деформации частей, частоты действующей магнитной силы, упругих свойств материала и акустических свойств машины [5].

Как показал опыт, наибольшие вибрации и соответственно шум (гудение) могут достичь опасной величины при резонансе, когда частота вынужденных колебаний частей (например, ротора) совпадает с частотой собственных колебаний. В подобных

случаях работа двигателя может оказаться невозможной из-за задевания ротором стали статора.

Опыт показывает, что издавать гудение могут также двигатели со статорными обмотками, выполненными с дробным числом пазов на полюс фазы, например при $q=2\ ^1/_2$, $3\ ^1/_2$, $4\ ^1/_2$ и т. д.

Кроме рассмотренных причин гудения, укажем еще на обычное гудение («пение») асинхронных двигателей, присущее всем электромагнитным устройствам переменного тока и объясняющееся магнитострикционными явлениями. Они заключаются в том, что процесс намагничивания ферромагнитных тел сопровождается изменением их объема. При вращении ротора его зубцы перемещаются относительно зубцов статора, что вызывает пульсацию магнитного потока, а это, в свою очередь, вызывает резкие периодические изменения магнитной индукции в зубцах статора и ротора. Получающиеся при этом периодические изменения объемных размеров зубцов и являются причиной гудения. Чрезмерное гудение по указанной причине появляется при большом магнитном насыщении зубцов двигателей.

Чтобы устранить эту неисправность, необходимо установить новый ротор с иным числом пазов. Но если ограничиться лишь ослаблением шума, то в некоторых случаях может помочь обточка ротора, увеличивающая зазор между ротором и статором. Последнее рекомендуется согласовать с заводом-изготовителем. Шум может быть также ослаблен при эластичной установке машины.

См. также примечание в п. 2-7-7.

2-10. ПЕРЕКРЫТИЕ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ

При пуске двигателя происходит перекрытие контактных колец электрической дугой. У двигателей с регулировкой частоты вращения (т. е. с постоянно налегающими щетками) перекрытие происходит иногда и во время работы двигателя.

А. *Контактные кольца и щеточный аппарат загрязнены маслом, медно-угольной и другой пылью.* При невнимательном уходе возможны также непосредственные замыкания между токопроводами щеток соседних фаз.

Содержать в чистоте и исправности контактные кольца и щеточный аппарат. При загрязнении маслом устранить причины попадания его на кольца.

Б. *Окружающий воздух обладает повышенной влажностью или насыщен кислотными или щелочными парами.*

При высоких напряжениях в роторе дополнительно

изолировать все токоведущие части щеточного аппарата и траверсы (обмотать лентой, покрыть лаком и т. п.) либо заменить двигатель другим, соответствующим условиям окружающей среды.

В. *Обрыв в соединениях между ротором и пусковым реостатом и в самом реостате.*

Проверить исправность соединений между ротором и пусковым реостатом; в случае обрыва или плохого контакта в соединениях — устранить неисправность.

Совершенно ошибочно мнение, что причиной перекрытия являются не указанные факторы, а перенапряжения, появляющиеся в роторе в момент включения двигателя. Если соединения между ротором и пусковым реостатом исправны и образуют замкнутую цепь, то в роторе не могут появиться опасные перенапряжения, способные послужить причиной перекрытия.

Не рекомендуется включать двигатель при разомкнутом реостате. При наличии в цепи пускового реостата размыкающего контакта следует ставить щетки реостата на первый рабочий контакт перед включением двигателя, а у жидкостного реостата — немного погрузить электроды в жидкость.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3-1. НЕИСПРАВНОСТИ ВОЗБУДИТЕЛЯ

См. гл. 1.

3-2. ИСКРЕНИЕ ЩЕТОК И ОБГОРАНИЕ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ

См. § 2-1 и 2-6.

3-3. ПЕРЕГРЕВ МАШИНЫ

См. § 1-2.

3-4. ПЕРЕГРЕВ АКТИВНОЙ СТАЛИ СТАТОРА

3-4-1. Активная сталь статора равномерно перегрета, хотя нагрузка генератора не превышает нормальной.

А. *Генератор работает с повышенным против номинального напряжением.* С повышением напряжения увеличиваются потери в стали, что и служит причиной ее перегрева. Одновременно с повышением перегрева стали наблюдается, конечно, и повышенный нагрев обмотки статора (см. п. 3-5-1), а вследствие увеличения тока возбуждения увеличивается также и нагрев обмотки возбуждения (см. § 3-6).

Понизить напряжение до номинального.

Б. *Генератор вращается с частотой вращения ниже номинальной вследствие неисправности первичного двигателя (у отдельно работающего генератора) или понижения частоты сети.*

Исправить первичный двигатель или принять меры для установления нормальной частоты сети.

3-4-2. Активная сталь местами сильно перегревается при холостом ходе генератора и нормальном напряжении генератора.

См. п. 2-3-2.

3-5. ПЕРЕГРЕВ ОБМОТКИ СТАТОРА

3-5-1. Вся обмотка равномерно перегрета.

Перегружен генератор или перегрета активная сталь статора.

См. § 1-2, п. А, Ж и п. 3-4-1.

3-5-2. Часть обмотки статора перегрета. Междуфазные напряжения неодинаковы. Генератор сильно гудит, и из него показывается дым. Если своевременно не отключить генератор от сети и не снять возбуждения, то может произойти пожар.

Междувитковое соединение, короткое замыкание между двумя фазами или замыкание на землю в двух местах обмотки статора.

См. п. 2-4-2, А, В и Г.

3-6. ПЕРЕГРЕВ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения нагрета выше нормы. Ток возбуждения больше номинального.

А. *Генератор работает с повышенным против номинального напряжением или частотой вращения ниже номинальной.*

См. п. 3-4-1.

Б. *Генератор работает с пониженным коэффициентом мощности, т. е. его реактивная мощность слишком велика. Вследствие этого ток возбуждения сильно увеличен.*

Снизить реактивную нагрузку или (у одиночно работающего генератора) принять меры к улучшению коэффициента мощности; заменить слабо нагружаемые двигате-

ли менее мощными; не допускать холостого хода двигателей; при параллельном включении нескольких трансформаторов следить за тем, чтобы все трансформаторы работали с полной нагрузкой, а лишние были выключены; установить статические конденсаторы или синхронный компенсатор.

В. *Междувитковое соединение или замыкание на корпус в двух местах обмотки возбуждения.* Такой дефект обычно сопровождается вибрацией машины (см. п. 4-6-3, В).

Нахождение дефекта см. в приложении 8.

3-7. ПЕРЕГРЕВ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ И ЩЕТОК

Контактные кольца и щетки перегреты, что обычно сопровождается искрением щеток.

См. § 2-6, а также приложение 4.

3-8. МЕСТНЫЕ ПЕРЕГРЕВЫ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

3-8-1. Перегреты ребра и поперечные стенки корпуса статора, нажимные плиты статорной стали и шпонки крепления плит.

В машине имеются блуждающие токи, вызываемые магнитными потоками, выходящими за пределы активной стали статора. Блуждающие токи появляются при большом насыщении активной стали статора. Эти токи обычно имеют место даже при незначительном повышении напряжения сверх допустимого 5 %-ного. Вследствие насыщения часть магнитного потока выходит за пределы активной стали и охватывает металлические контуры корпуса статора (рис. 3-1). Линии магнитной индукции главного потока, проходящие по активной стали статора, показаны сплошными, а линии магнитной индукции, ответвляющиеся в корпус статора,— штриховыми. Ответвляющимся потоком индуктируется переменная ЭДС машины. Токи, текущие вдоль ребер, замыкаются главным образом через торцевые части корпуса: поперечные стенки, нажимные плиты, крайние пакеты активной стали.

Блуждающие токи могут достичь большого значения и вызвать сильные перегревы указанных частей машины. Особенно сильно нагреваются шпонки (рис. 3-2), крепящие нажимные плиты (шпоночное крепление плит встречается в некоторых старых типах турбогенераторов), и сегменты крайних пакетов активной стали в местах соприкосновения сегментов с ласточкиными хвостами ребер (см. рис. 3-1). В некоторых случаях нагрев контактов в этих частях может вызвать даже их оплавление и появление искр.

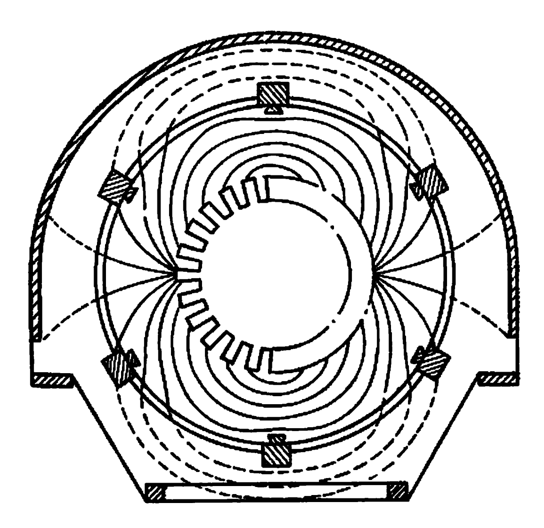


Рис. 3-1. Магнитные потоки, ответвляющиеся в корпус статора турбогенератора

Радикальным способом устранения или уменьшения блуждающих токов является работа машины при нормальном напряжении.

Следует отметить, что нагрев нажимных плит, шпонок и крайних пакетов активной стали может быть и от других причин (см. п. 3-8-3). Поэтому, прежде чем приступить к устранению неисправности, следует путем испы-

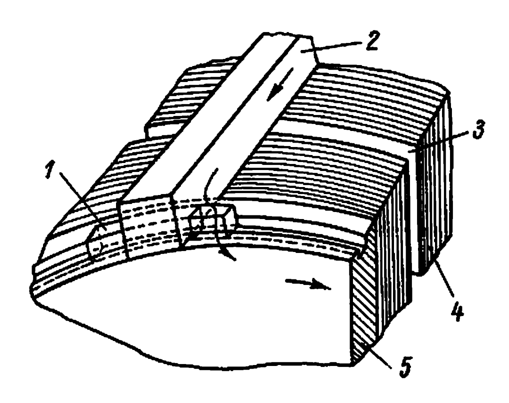


Рис. 3-2. Крепление нажимной плиты статора турбогенератора
1 — шпонка; 2 — ребро; 3 — вентиляционный канал; 4 — активная сталь; 5 — нажимная плита

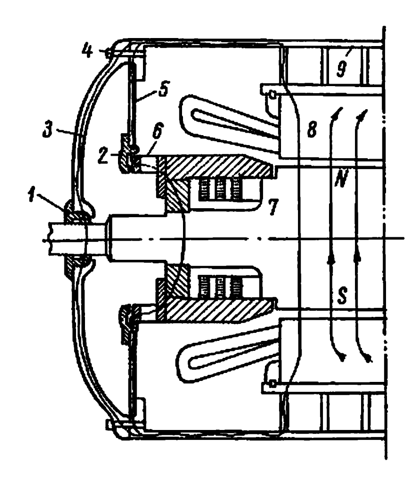


Рис. 3-3. Магнитные линии, ответвляющиеся в конструктивные части турбогенератора

1 — уплотнение щитов; *2* — диффузор; *3* — щит; *4* — болт; *5* — внутренний щиток; *6* — вентилятор; *7* — ротор; *8* — активная сталь; *9* — стенка корпуса

тания машины в режимах холостого хода и короткого замыкания убедиться в правильности диагноза.

3-8-2. Перегреты щиты, стенки и обшивка корпуса статора, внутренние щиты и болты, крепящие щиты к корпусу статора.

Магнитные потоки выходят за пределы активной стали статора. На рис. 3-3 показаны магнитные линии потока, ответвляющегося в конструктивные части турбогенератора. Так как этот магнитный поток является переменным, то образующиеся вихревые токи вызывают нагревание конструктивных частей турбогенератора.

Рассмотрение путей прохождения линий ответвляющегося потока показывает, что они концентрируются около вала ротора, а также во внутренних щитках вблизи вентилятора ротора. Поэтому в этих местах может быть наиболее сильное нагревание. Учитывая это, заводы-изготовители выполняют детали, находящиеся в этих местах (уплотнения и диффузоры), из немагнитных материалов.

Для уменьшения нагревания щитов вблизи вала ротора, а также внутренних щитков рекомендуется увеличить размеры вставок из немагнитных материалов. С той же целью стальные болты для крепления щитов полезно заменить латунными.

3-8-3. Перегреты лобовые части обмотки статора, нажимные плиты статорной стали, шпонки, крепящие плиты, щиты статора и крайние пакеты активной стали.

Перегрев вызван потоками рассеяния лобовых частей статорной обмотки.

Особенно сильно перегреваются эти части у турбогенераторов устаревших типов.

Магнитные линии рассеяния лобовых частей обмотки (рис. 3-4) замыкаются через крайний пакет стали статора *1*, щит *2*, бандаж ротора *3*, нажимную плиту *4* (вставка из немагнит-

Рис. 3-4. Схема замыкания магнитных линий рассеяния лобовых частей обмотки статора

ного материала в бандаже на рисунке не заштрихована).

Поток рассеяния лобовых частей, являясь переменным, нагревает детали, находящиеся вблизи этих частей. Степень нагрева зависит от величин полей, которые, в свою очередь, определяются главным образом конструкцией лобовых частей обмотки, а также материалом нажимных плит и роторных бандажей (капп). Так, очень большому нагреву подвержены эвольвентные лобовые части обмоток турбогенераторов старых типов, выполненные в виде массивных вилок. Их нагрев, подчас приводящий к обугливанию изоляции и нарушению паек, может вызвать аварию машины.

Нарушению паек из-за нагрева может способствовать и расположение их в местах с большой индукцией потока рассеяния.

Значительному нагреву подвергаются нажимные плиты, если они выполнены из обычной (магнитной) стали, и щиты статора, особенно в местах входа потока рассеяния.

Шпонки, крепящие нажимные плиты, могут нагреваться от токов, индуктируемых потоком рассеяния в замкнутых контурах, состоящих, например, из нажимной плиты, шпонки, болтов, крепящих лобовые части, и металлической накладки на лобовой части. Нагреваются шпонки и от вихревых токов, вызванных потоками рассеяния.

Устранение или уменьшение перегревов по указанной причине возможно лишь путем сложных конструктивных изменений. Так, в современных турбогенераторах это достигнуто благодаря применению двухслойных статорных обмоток с укороченным шагом и конусным расположением лобовых частей, отставленных бандажей ротора или бандажей из немагнитной стали (в случае их насаживания на бочку ротора), нажимных плит из немагнитного материала, а также благодаря отказу от применения шпонок для крепления нажимных плит.

Единственным простым средством, служащим для той же цели, является снижение токовой нагрузки машины.

Так как перегрев шпонок, нажимных плит и крайних пакетов активной стали, а также щитов возможен и от других причин (см. пп. 3-8-1 и 3-8-2), то для установления действительной причины перегревов следует испытать

турбогенератор в режимах холостого хода и короткого замыкания. В режиме холостого хода напряжение статора повышают на 10 % сверх номинального. Опыт короткого замыкания проводят при номинальном токе, а для крупных машин — при токе, составляющем 80 % номинального. Для выявления перегрева немассивных частей (шпонок) может оказаться достаточным проведение каждого из этих опытов в течение получаса.

Если перегрев частей проявляется в режиме короткого замыкания и не проявляется в режиме холостого хода, то причиной перегрева служат потоки рассеяния лобовых частей; если же перегрев проявляется в режиме холостого хода, то причиной перегрева являются потоки, ответвляющиеся в конструктивной части машины [1].

3-8-4. Перегреты отдельные участки поверхности ротора, пазовых клиньев у концов бочки ротора, бандажей в месте посадки их на бочку ротора.

Имеет место несимметричная нагрузка статора, или произошло несимметричное короткое замыкание.

При несимметричной нагрузке турбогенератора возникает магнитный поток в бочке ротора, вызывающий токи двойной частоты (100 Гц), которые протекают по относительно тонкому внешнему его слою. Токи замыкаются через поверхности соприкосновения пазовых клиньев и зубцов ротора (главным образом вблизи торцов ротора), пазовых клиньев и зубцов с бандажами. В этих контактах и выделяется так много тепла, что температура может подняться до 500—700° С; могут появиться подгары бандажей в местах их посадки на бочку ротора. Высокая температура вызывает понижение механической прочности металла, что особенно опасно для бандажей (известны аварии вследствие образования трещин в бандажах и выкрашивания их в месте посадки на бочку ротора). Кроме этого, чрезмерные перегревы могут оказаться опасными и для изоляции обмотки ротора.

Особенно опасна несимметричная нагрузка для роторов с проволочными бандажами, встречающимися лишь на старых установках: происходит расплавление олова и ослабление замков на бандажах, что приводит к аварии турбогенератора.

Необходимо устранить несимметричную нагрузку.

В соответствии с правилами технической эксплуатации

---

[1] Из местных перегревов частей турбогенератора, указанных в пп. 3-8-1, 3-8-2 и 3-8-3, наиболее опасными являются перегревы шпонок (известны крупные аварии, вызванные повреждением шпонок) и лобовых частей обмотки статора, в то время как перегрев щитов или ребер корпуса непосредственной опасности для машины не представляет.

электрических станций и сетей для турбогенераторов допускается длительная работа при полной нагрузке с неравенством токов в фазах, не превышающим 10 % номинального тока. При этом ни в одной фазе ток не должен превышать номинального значения. При меньшей нагрузке, определяемой испытаниями, генераторы могут работать при большем неравенстве токов в фазах.

ЛПЭО «Электросила» допускает при длительной нагрузке несимметрию токов (отношение разности наибольшего и наименьшего токов к наибольшему току), составляющую 10 % для турбогенераторов с бандажами, насаженными на бочку ротора, и 15 % для генераторов с отставленными бандажами. Ток в наиболее нагруженной фазе не должен превышать значения, допускаемого для данных условий работы на симметричную нагрузку.

3-9. ОТСУТСТВИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ ГЕНЕРАТОРА

3-9-1. Возбудитель не дает напряжения.

См. § 1-6.

3-9-2. Возбудитель дает напряжение, но в цепи возбуждения генератора нет тока.

Имеется обрыв или плохой контакт в частях цепи возбуждения генератора, перечисленных ниже, в пп. А — Ж.

А. *В магнитном регуляторе.*

Проверить и исправить магнитный регулятор.

Б. *В междуполюсных соединениях ротора с явно выраженными полюсами.*

Проверить исправное состояние междуполюсных соединений катушек.

В. *В выводных концах одной или нескольких полюсных катушек ротора с явно выраженными полюсами.*

Выводные концы исправить. Если это невозможно, установить исправные катушки.

Г. *В токоподводах между обмоткой и контактными кольцами.*

Измерить сопротивление обмотки. В случае сильного увеличения сопротивления против номинального или полного обрыва в роторе — вскрыть токоподводы и отремонтировать.

Д. *В соединительных проводах между возбудителем и контактными кольцами.*

Проверить при помощи мегомметра или контрольной лампы соединительные провода; при обнаружении обрыва — устранить его.

Е. *Между контактными кольцами и щетками вследствие сильного износа щеток, загрязнения или окисления контактных поверхностей и т. п.*

Тщательно очистить от грязи контактные кольца, щетки и щеточный аппарат; сильно изношенные части заменить новыми.

Ж. *Внутри полюсной катушки (редко встречающийся случай).*

Нахождение и устранение дефектов см. в приложении 8.

3-9-3. При включении цепи возбуждения генератора возбудитель дает очень большой ток. В некоторых случаях при этом наблюдается искрение щеток возбудителя, как при коротком замыкании (см. п. 1-1-16, Г).

Короткое замыкание между проводами, соединяющими возбудитель с контактными кольцами, или между контактными кольцами.

Повышение тока возбуждения происходит также при коротком замыкании одной или нескольких катушек обмотки возбуждения, но генератор при этом дает напряжение.

Найти при помощи контрольной лампы или мегомметра место короткого замыкания и устранить его.

3-10. НАЛИЧИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТОЛЬКО МЕЖДУ ДВУМЯ ФАЗАМИ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ ГЕНЕРАТОРА

Возбуждение исправно, но в обмотке статора получается напряжение только между двумя фазами.

Обрыв в одной фазе обмотки статора при соединении звездой или обрыв в двух фазах обмотки при соединении треугольником.

Найти и устранить обрыв (см. приложение 8). Если обрыв находится во внешних соединениях обмотки, то восстановить соединение; если же обрыв находится внутри катушки, то перемотать ее или заменить новой.

3-11. ПОНИЖЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ ГЕНЕРАТОРА

3-11-1. Возбудитель не дает номинального напряжения.

См. пп. 1-6-1 — 1-6-6.

3-11-2. Частота вращения генератора ниже номинальной.

См. п. 3-4-1, Б.

3-11-3. Напряжение генератора при номинальной частоте вращения и номинальном токе возбуждения меньше номинального.

А. См. п. 2-4-1, В.

Б. *Одна или несколько катушек каждой фазы обмотки статора неправильно соединены и противодействуют друг другу* (см. п. 3-12-1).

Правильно соединить обмотку статора.

В. *Неверно соединены катушки обмотки возбуждения, например из-за неправильного чередования катушек с правой и левой обмоткой.*

Проверить полярность катушек и правильно их соединить (см. приложение 2).

Г. *Междувитковое соединение или заземление в двух местах обмотки возбуждения* (см. также § 3-6, п. В).

Нахождение и устранение дефекта см. в приложении 8.

3-12. НЕРАВЕНСТВО МЕЖДУФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ ГЕНЕРАТОРА

3-12-1. Междуфазные напряжения неодинаковы. Обмотка статора не нагревается.

Одна или несколько катушек обмотки статора неправильно соединены («перевернуты») и противодействуют друг другу, причем число неправильно соединенных катушек в отдельных фазах неодинаково. Такое неправильное соединение встречается редко.

Проверить соединения катушек и при обнаружении неисправности ликвидировать ее.

3-12-2. См. п. 3-5-2.

3-13. КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Напряжение генератора при работе с нагрузкой и при холостом ходе постоянно колеблется. Частота вращения постоянна.

Плохой контакт в цепи возбуждения.

См. п. 3-9-2.

3-14. КОЛЕБАНИЕ МОЩНОСТИ И СИЛЫ ТОКА ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В ОДИНОЧКУ

См. п. 1-7-4 и § 3-13.

3-15. НЕИСПРАВНОСТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ

3-15-1. Параллельная работа генераторов отличается неустойчивостью, ток и мощность колеблются. Это «качание»

может быть настолько велико, что генератор выпадает из синхронизма.

Признаки выпадения из синхронизма: ток в статоре и мощность резко колеблются, толчки их намного превышают нормальные значения и выходят за пределы шкалы приборов; напряжение генератора и шин резко колеблется, обычно опускаясь ниже нормы; ток ротора сильно колеблется около нормального значения; генераторы обычно издают гул, пульсирующий в такт с «качанием» приборов.

А. *Неисправен регулятор первичного двигателя. Слишком велика разница в степени неравномерности хода первичных двигателей (паровые машины и двигатели внутреннего сгорания) отдельных генераторов, особенно при отсутствии успокоительной (демпферной) обмотки в полюсных наконечниках ротора.*

Исправить регуляторы первичных двигателей; включить реакторы между генераторами и сборными шинами. Запросить завод-изготовитель.

Б. *Нарушена динамическая устойчивость сложной сети, на которую работают генераторы. Это нарушение может быть вызвано включением или отключением одного или нескольких генераторов или крупных потребителей, изменением схемы соединений сети, авариями в сети, особенно коротким замыканием.*

К мероприятиям, повышающим устойчивость, относятся: быстрое отключение коротких замыканий, форсировка возбуждения при коротких замыканиях, применение автоматического повторного включения линий, секционирование длинных линий передачи и пр.

В связи с тем что действия обслуживающего персонала зависят от ряда условий, необходимо при «качаниях» руководствоваться местной инструкцией, имеющейся на электростанции.

3-15-2. Генератор потерял возбуждение. Режим работы генератора изменился: ток ротора близок к нулю, напряжение на шинах генератора понижено, мощность по ваттметру меньше нормальной, ток статора повышен, стрелка фазометра переходит в емкостный квадрат, ваттметр реактивной мощности показывает потребление реактивной мощности. Генератор перешел в асинхронный режим.

См. § 3-9.

В соответствии с действующими правилами (см. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей) допускается работа турбогенератора в асинхронном режиме без возбуждения в течение 30 мин. В турбогенераторах, имеющих роторы с проволочными бандажами или наборными зубьями, такая работа не разрешается.

Допускаемое значение нагрузки в асинхронном режиме устанавливается испытаниями.

Что касается гидрогенераторов, как имеющих успокоительную обмотку, так и не имеющих ее, то их работа в асинхронном режиме не допускается, и поэтому, если не удается быстро восстановить возбуждение, их надо отключить от сети.

3-15-3. Генератор работает в режиме электродвигателя. Признаки работы генератора в режиме двигателя: изменяется направление активной энергии (ваттметр показывает в обратную сторону); потребление реактивной мощности, как правило, повышается, ток статора может иметь несколько пониженное значение; напряжение статора, а также ток и напряжение возбуждения остаются неизменными.

Неисправность регулятора первичного двигателя привела к прекращению доступа пара, горючего, воды.

Отремонтировать регулятор.

Работа генератора в режиме электродвигателя может быть сколь угодно длительной; ее ограничивают лишь условия работы первичного двигателя.

3-15-4. Между параллельно работающими генераторами появились уравнительные токи, несмотря на правильно отрегулированное возбуждение. У параллельно работающих генераторов с выведенной нейтралью уравнительные токи могут протекать также по нейтральному проводу.

Формы кривой ЭДС отдельных генераторов весьма различны.

Включить реактивные катушки между генераторами и собирательными шинами, а также в нейтральный провод. При измерении уравнительных токов иметь в виду их повышенную частоту, в связи с чем пользоваться для их измерения только приборами, показания которых не зависят от частоты (лучше всего тепловыми приборами).

3-16. НАМАГНИЧИВАНИЕ ВАЛА

Вал сильно намагничен (неисправность встречается главным образом в быстроходных синхронных машинах).

Нарушена симметрия магнитного поля вследствие междувиткового соединения в обмотке ротора.

Размагнитить вал (см. приложение 9).

3-17. ОСЕВОЙ СДВИГ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Осевой сдвиг ротора турбогенератора вследствие его конструктивных особенностей может быть и по причинам, не указанным в § 4-8 для всякой электрической машины.

При холостом ходе как без возбуждения, так и с возбуждением ротор имеет нормальный осевой разбег в обе стороны. При нагрузке генератора происходит смещение ротора в одну сторону, усиливающееся с увеличением нагрузки. При передвижении статора в сторону, противоположную сдвигу ротора, смещение ротора не только не уменьшается, но, наоборот, увеличивается в прежнем направлении до упора в торец вкладыша подшипника, причем давление на подшипник может настолько повыситься, что произойдет выработка торца вкладыша.

Ротор снабжен бандажами (каппами) из обыкновенной, а не из специальной немагнитной стали. Нормальное положение ротора относительно статора при симметрии магнитных осей показано на рис. 3-5, *а*. Если имеется асимметрия осей полей рассеяния лобовых частей обмотки статора и магнитных осей бандажей ротора относительно оси основного магнитного поля, то ротор при нагрузке генератора будет передвигаться в одну сторону вследствие взаимодействия полей рассеяния и бандажей, так как осевое действие полей рассеяния лобовых частей обмотки сильнее действия основных магнитных полей (рис. 3-5, *б*).

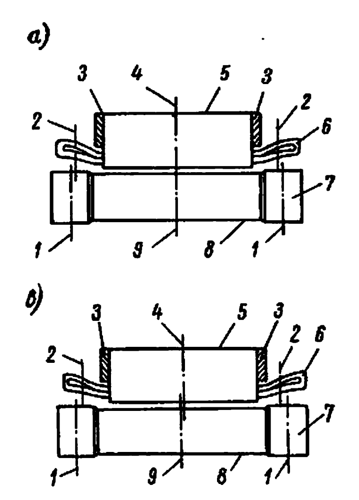
Чтобы определить качество бандажей, т. е. установить, магнитные они или немагнитные, к ним подносят магнитную стрелку. Если стрелка притягивается, значит, бандаж магнитный; в противном случае он немагнитный.

Для устранения осевого смещения ротора при нагрузке генератора необходимо передвинуть статор в сторону сдвига ротора, если бандажи магнитные, и в противоположную сторону, если они немагнитные. Смещение статора в сторону сдвига ротора, т. е. удаление бандажа ротора от лобовых частей обмотки статора с одной стороны генератора и сближение их между собой с другой стороны машины, уравновешивает действие полей рассеяния лобовых частей обмотки статора на бандажи.

В результате этого ротор занимает некоторое среднее положение (рис. 3-5, *в*).

По этому положению нужно установить подшипники, чтобы не происходило набегания ротора ни на один из них, а осевой разбег ротора в обе стороны был по возможности одинаковым.

Так как при малейшем сдвиге от этого среднего положения ротор пойдет дальше по направлению сдвига



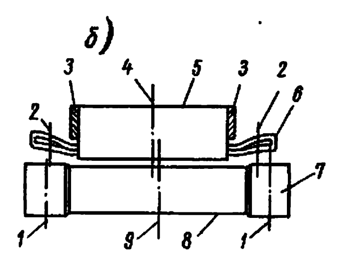


Рис. 3-5. Различные положения ротора с магнитными бандажами по отношению к статору: *а* — при симметрии магнитных осей; *б* — при асимметрии осей полей рассеяния лобовых частей обмотки статора и магнитных осей статора и ротора (сильный односторонний сдвиг ротора из-за неправильной установки статора); *в* — установившееся положение ротора при асимметрии осей полей рассеяния лобовых частей обмотки статора и бандажей ротора при предварительно правильной установке статора

1 — магнитная ось бандажей ротора; *2* — ось полей рассеяния лобовых частей обмотки статора; *3* — нажимная плита; *4* — магнитная ось статора; *5* — активная сталь статора; *6* — лобовая часть обмотки статора; *7* — бандаж ротора; *8* — бочка ротора; *9* — магнитная ось ротора

до упора в торец вкладыша подшипника (из-за возникновения больших усилий с той стороны, где расстояние между осями лобовых частей и бандажа становится меньше), то осевой разбег ротора следует сделать по возможности минимальным, учитывая, однако, его тепловое расширение.

Вследствие указанного выше передвижения статора нарушается совпадение магнитных осей статора и ротора (рис. 3-5, *в*), и при холостом ходе возбужденного генератора может произойти некоторое смещение ротора в обратном направлении и набегание его на один из подшипников; такое явление у роторов с магнитными бандажами встречается часто. Если набегание незначительно, то разбег ротора можно не увеличивать; если же существует опасение, что набегание ротора может вызвать срабатывание торца вкладыша, то необходимо подшабрить вкладыш или передвинуть подшипник.

3-18. ЗАТРУДНЕНИЯ ПРИ АСИНХРОННОМ ПУСКЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

3-18-1. См. п. 2-7-1.

3-18-2. Двигатель не идет в ход; в одной фазе статора нет тока.

См. п. 2-7-2.

3-18-3. Двигатель не идет в ход или идет в ход, но не разворачивается до нормальной частоты вращения. Сила тока во всех трех фазах одинакова.

А. *При пуске пониженное напряжение сети; пуск двигателя от несоответствующего ответвления автотрансформатора или через неправильно выбранный реактор.*

Измерить напряжение сети на первичных зажимах пускового автотрансформатора или реактора; если напряжение на 10—15 % ниже номинального, то это может быть причиной того, что двигатель не идет в ход. Необходимо в таком случае повысить напряжение сети до номинального. Если же это невозможно или напряжение сети окажется нормальным, то для повышения пускового напряжения необходимо переключить двигатель на следующую ступень пускового автотрансформатора или реактора.

Если пусковой автотрансформатор выполнен с ответвлениями на первичной обмотке, то соответствующим переключением первичной обмотки также может быть повышено его вторичное (пусковое) напряжение.

Если пуск осуществляется от реактора, то для увеличения пускового напряжения нужно уменьшить реактивное сопротивление катушки, что достигается весьма просто — увеличением воздушного зазора между верхней и нижней половинами сердечника.

Если же увеличение зазора невозможно, то необходимо уменьшить число витков катушки.

Б. *Слишком велика нагрузка при пуске.*

Снизить нагрузку при пуске.

В. *При автотрансформаторном пуске возбуждение в двигатель подается не при полном (номинальном) напряжении на зажимах статора, а при пониженном.* В связи с этим двигатель не развивает так называемого подсинхронного момента (момента при частоте вращения, составляющей 95 % синхронной), необходимого для вхождения двигателя в синхронизм.

Перестроить схему пуска двигателя с подачей возбуждения при полном напряжении на зажимах статора.

Следует отметить, что хорошие условия пуска синхронного двигателя могут быть достигнуты при пуске от

полного напряжения сети, т. е. при так называемом прямом пуске — без каких-либо пусковых устройств (автотрансформатор, реактор). При таком пуске достигается значительное упрощение пусковой схемы; пусковая обмотка ротора, как показал опыт, нагревается за время пуска меньше, чем при пуске от пониженного напряжения. Таким образом, прямой пуск значительно упрощает эксплуатацию двигателя, не снижая при этом надежность его работы. Поэтому, если двигатель плохо разворачивается, следует перейти на его прямой пуск. Для большинства двигателей, работающих от достаточно мощной питающей сети, такой пуск является вполне допустимым и никакой опасности для электродвигателя не представляет.

В некоторых случаях для такого пуска может оказаться необходимым усилить крепление лобовых частей обмотки статора. И лишь в довольно ограниченном числе случаев, например когда речь идет о двигателях весьма большой мощности (компенсаторах), прямой пуск может оказаться недопустимым или нежелательным.

Вопрос о переводе двигателя на прямой пуск следует согласовать с заводом-изготовителем.

Г. *Междувитковое соединение в некоторых катушках обмотки возбуждения.*

Найти неисправные катушки (см. приложение 8), отремонтировать их или заменить новыми.

3-18-4. То же, что в п. 3-18-3, но в роторе иногда появляются вспышки или искрение.

Плохой контакт в пусковой (демпферной) обмотке, а также в местах соединения отдельных стержней с короткозамыкающими кольцами или в перемычках, соединяющих отдельные сегменты короткозамыкающего кольца между собой.

Проверить все контакты пусковой обмотки. Стержни, имеющие плохой контакт с кольцами, припаять тугоплавким припоем; все соединения между отдельными сегментами короткозамыкающих колец вскрыть для проверки, так как возможно окисление контактных поверхностей, незаметное при наружном осмотре.

Контактные поверхности тщательно вычистить и в случае надобности вновь пригнать и облудить.

3-18-5. Двигатель не идет в ход и сильно гудит. Сила тока во всех трех фазах различна. Часть обмотки статора сильно нагревается.

См. п. 2-4-2.

3-18-6. То же, что в п. 3-18-5, но обмотка статора не нагревается.

Неисправен пусковой автотрансформатор, или неправильно сделано внутреннее соединение обмотки статора (см. п. 3-11-3, Б).

Для определения причины неисправности следует отсоединить двигатель от пускового автотрансформатора (реактора), включить последний в сеть без двигателя и измерить напряжение на всех его ступенях (ответвлениях). Если междуфазные напряжения окажутся различными или будет обнаружена какая-либо другая неисправность, то необходимо исправить автотрансформатор.

Если же трансформатор окажется в порядке, то имеется неисправность двигателя.

Проверить соединение катушек и при обнаружении неисправности ликвидировать ее.

3-19. КОЛЕБАНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ВЫПАДЕНИЕ ЕГО ИЗ СИНХРОНИЗМА

3-19-1. При работе двигателя происходят колебания (качания) ротора, обнаруживаемые по колебаниям стрелок амперметра и ваттметра в цепи статора. Никаких неисправностей в двигателе найти не удается. Колебания могут быть столь сильными, что двигатель выпадает из синхронизма.

А. *Слишком быстро изменяется нагрузка.*

Увеличить ток возбуждения двигателя. Во многих случаях это значительно снижает колебания.

Б. *Колебания передаются от приводимых механизмов, например поршневых компрессоров, насосов и пр.*

См. п. 3-19-1, А.

В. *Сильно колеблются напряжение и частота.*

Ощущаются динамические толчки из-за коротких замыканий в питающей сети или (в случае работы по схеме двигатель — генератор) из-за коротких замыканий в сети, питаемой генератором.

Форсировка возбуждения (подача максимального «потолочного» возбуждения) увеличивает устойчивость двигателя при этих переходных процессах.

3-19-2. Двигатель выпадает из синхронизма. Причины, указанные в п. 3-19-1, отсутствуют.

А. *Двигатель перегружен.*

Устранить перегрузку.

Б. См. п. 3-9-2.

В. *Произошло повреждение (короткое замыкание, обрыв и пр.) в сети, питающей ротор двигателя (при возбуждении от независимой сети постоянного тока).*

При помощи мегомметра найти место короткого замыкания или обрыва (см. приложение 8) и устранить повреждение.

Г. *Произошло повреждение в сети, питающей статор.*

См. п. 3-18-3, В.

3-19-3. После включения двигателя и установления нормальной нагрузки ток статора постепенно растет и достигает наибольшего допустимого значения, при котором двигатель автоматически отключается.

Пристроенный возбудитель работает без искрения при относительно небольшом напряжении. Коммутируемые секции вызывают вследствие ускоренной коммутации заметное в этом режиме возбудителя продольное подмагничивание главных полюсов (см. приложение 10, рис. П10-6), *что приводит к постепенному возрастанию тока ротора.*

Убедиться в том, что щетки находятся на нейтрали (см. приложение 4), после чего сдвинуть траверсу по направлению вращения на 1—2 коллекторные пластины.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОБЩИЕ НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

4-1. ОБРАЗОВАНИЕ ПЯТЕН НА КОЛЛЕКТОРАХ И КОНТАКТНЫХ КОЛЬЦАХ НЕРАБОТАЮЩИХ МАШИН. НЕРАВНОМЕРНЫЙ ИЗНОС КОЛЛЕКТОРОВ, КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ И ЩЕТОК

4-1-1. На коллекторах или контактных кольцах образуются пятна, имеющие матовый оттенок; иногда под щетками появляется окись. Пятна наблюдаются только после более или менее длительного простоя машин. При работе машины такие пятна вызывают искрение щеток; места, покрытые пятнами, обгорают и становятся шероховатыми, вследствие чего искрение щеток усиливается.

При перерыве работы машины, находящейся в сыром помещении, щетка, коллектор (контактное кольцо) и влажный воздух, находящийся в контактном слое, образуют гальванический элемент, посылающий ток через замкнутую цепь, образованную щеткой, коллектором (контактным кольцом), траверсой,

обмоткой возбуждения и пр. Эти электрохимические явления особенно сильны, если контактные кольца сделаны из стали, а также при применении некоторых сортов графитных щеток.

Если машина остановлена на продолжительное время, а также при хранении ее на складе и при транспортировке следует между щетками и коллектором (контактными кольцами) проложить электрокартон или какой-либо другой изоляционный материал и тем самым прервать цепь тока.

Для уничтожения имеющихся пятен и устранения связанного с ними искрения необходимо проточить коллектор (контактные кольца), как указано в приложении 4.

4-1-2. На контактных кольцах работающих одноякорных преобразователей и синхронных двигателей образуются пятна.

А. *В одноякорном преобразователе пятна образуются, если щетки расположены так, что при каждом обороте якоря максимальное значение переменного тока приходится на одно и то же место кольца и ток проходит в том же направлении от щетки к кольцу. Поэтому кольцо в указанном месте нагружается сильнее.* В процессе эксплуатации из небольших пятен могут образоваться шероховатые, разъеденные места, что вызывает искрение щеток.

Б. *На контактных кольцах однофазных генераторов пятна могут образоваться также от обратносинхронного поля.* Известно, что магнитное поле однофазного генератора можно рассматривать состоящим из двух полей, вращающихся в противоположные стороны с одинаковой частотой вращения, причем одно поле вращается синхронно с ротором, а другое — в противоположном направлении с такой же частотой вращения. Это так называемое обратносинхронное поле пересекает обмотку ротора с двойной частотой и возбуждает в ней ток двойной частоты, который, суммируясь с постоянным током машины, образует пульсирующий ток в замкнутой цепи обмотки ротора. Места колец, повторно подвергающиеся действию максимального тока, перегружаются током и быстрее изнашиваются, что служит причиной искрения щеток.

В. *В трехфазных генераторах пятна на контактных кольцах могут появиться при несимметричной нагрузке (от токов обратной последовательности).*

Снять пятна с контактных колец проточкой и шлифовкой (см. приложение 4). Чтобы предотвратить пятнообразование у одноякорных преобразователей, изменить расположение щеток на контактных кольцах.

4-1-3. Контактные кольца синхронных машин изнашиваются неравномерно. Отрицательное кольцо изнашивается больше по-

ложительного, причем рабочая поверхность первого становится матовой, шероховатой, а второго — остается полированной. Щетки, установленные на отрицательном кольце, также изнашиваются больше. При бронзовых и медных кольцах неравномерность износа выражена резче, при остальных кольцах — слабее.

Ток переносит частицы металла с отрицательного кольца на щетку, причем это явление усиливается при повышенных нагрузках током.

Устранить шероховатость кольца проточкой и шлифовкой (см. приложение 4). Чтобы предотвратить дальнейший неравномерный износ, периодически, например два раза в год, менять полярность контактных колец.

4-1-4. Коллектор и контактные кольца подвергаются повышенному и неравномерному износу.

А. *Выбраны неподходящие (слишком твердые) щетки.* При нормальной работе на поверхности коллектора (контактных колец) образуется тончайшая оксидная пленка — «политура», которая улучшает коммутацию и предохраняет коллектор (контактные кольца) от повышенного износа. Слишком же твердые щетки эту пленку сдирают.

Установить щетки, рекомендуемые заводом-изготовителем. При отсутствии заводских данных см. приложение 5.

Б. *Слишком велико давление щеток на коллектор (контактные кольца).*

Установить давление щеток в соответствии с данными завода-изготовителя. См. также приложение 5.

В. *На коллекторе (контактных кольцах) применены щетки различных, в том числе и неподходящих, марок, в результате чего на поверхности коллектора (контактных колец) получаются кольцевые «дорожки».*

Установить одинаковые щетки на всей машине в соответствии с данными завода-изготовителя.

Если это невыполнимо, на каждый бракет установить щетки одной марки.

Г. *Положительные и отрицательные щетки, неодинаково изнашивая коллектор, способствуют образованию на нем кольцевых «дорожек».*

Чтобы износ коллектора был равномерным, расставить щетки на коллекторе с определенным сдвигом, а именно так, чтобы щетки одной пары соседних бракетов работали по одним кольцевым дорожкам коллектора, а щетки другой пары — по другим. Установку щеток см. в приложении 4.

Д. *Вибрирует якорь (ротор).*

См. § 4-6.

4-1-5. Чрезмерно велик износ щеток.

А. См. пп. 4-1-3 и 4-1-4, Б.

Б. *На коллекторе установлены щетки неподходящей марки; они слишком мягки или не соответствуют заданной окружной скорости.*

См. п. 4-1-4, А.

В. *Повышенная плотность тока в щетках.*

См. п. 4-1-4, А.

Г. *Поверхность коллектора (контактных колец) стала неровной.*

Проточить и отшлифовать коллектор (см. приложение 4).

Д. См. п. 4-1-4, Д.

Е. *Щетки сильно искрят вследствие плохой коммутации.*

Наладить коммутацию (см. приложение 7).

Ж. *Ток неравномерно распределяется между щетками.*

Проверить, насколько равномерен нажим щеток на коллектор, и добиться, чтобы нажим всех щеток не выходил за пределы допуска.

Проверить состояние всех контактов щеточного аппарата и подтянуть все болты с последующей проверкой состояния всех контактов по методу падения напряжения (см. приложение 8).

З. *Коллектор (контактные кольца) загрязнен пылью от щеток или посторонней металлической, песчаной или цементной пылью.*

Улучшить уход за коллектором (контактными кольцами) и щетками, производя более частую и тщательную очитку; оградить машину от попадания в нее посторонней пыли.

4-2. ПРОБОЙ ОБМОТОК НА КОРПУС

Ниже перечисляются возможные причины пробоя и меры по их устранению.

4-2-1. Обмотки увлажнились: во время транспортировки, вследствие продолжительного хранения машин в сыром, неотапливаемом помещении, при продолжительных перерывах в работе машин, особенно в сырое время года, вследствие непосредственного попадания воды в машину, например при прорыве водопроводных труб, при пожаре, наводнении и т. п., от действия водяных паров при наличии неплотностей в соединениях паровых труб в машинном помещении.

Предупредить увлажнение обмоток во время хранения машин, оборудовав склад хорошей вентиляцией; выбирать под склады только сухие помещения.

Останавливая машины с проточной вентиляцией на продолжительное время, закрывать при сырой, туманной погоде все шиберы воздушных каналов для поступающего и выходящего воздуха. Наоборот, при хорошей, сухой погоде все шиберы держать открытыми.

Если работа машины периодически чередуется с длительными перерывами, установить специальные электрические грелки и включать их на время остановок машины (по примеру машин прокатных станов).

Для работы во влажной среде применять закрытые машины либо машины с влагостойкой изоляцией.

Отсыревшие машины перед пуском просушить во избежание пробоя изоляции обмоток на корпус (см. приложение 10).

4-2-2. Машина загрязнена.

А. *Чрезмерный износ щеток, коллекторов и контактных колец приводит к образованию токопроводящих мостиков из угольной и медной пыли.*

См. пп. 4-1-4 и 4-1-5.

Б. *Загрязненный воздух из машинного помещения засасывается через неплотности в корпус машины с замкнутой или проточной вентиляцией; то же происходит при неисправности воздушных фильтров.*

Уплотнить корпус машины и воздухопроводы или произвести ремонт воздушных фильтров.

В. *В машинное помещение попадает пыль.* В рабочих помещениях металлургических и угольных предприятий, прокатных и коксовых цехов и т. д. пыль настолько мелка и легка, что осаждается не только на коллекторах, контактных кольцах и наружных частях обмотки, но и проникает внутрь машины, в такие ее места, куда попадание ее, казалось бы, невозможно; она образует проводящие мостики, которые постепенно могут вызвать перекрытие или пробой на корпус.

К машинам, установленным в таких помещениях, охлаждающий воздух следует подводить извне. В необходимых случаях надо ставить фильтры либо герметизировать машины, по поводу чего необходимо обратиться на завод-изготовитель.

Следует отметить, что засорение лобовых частей обмоток крупных быстроходных машин (турбогенераторов) полупроводящей пылью представляет немалую опасность,

так как от емкостных токов эта пыль может сильно нагреться, вспыхнуть и вызвать пожар в машине.

Г. *Надзор за машиной и уход за ней недостаточны.*

Машину содержать в чистоте, производя ежедневно ее чистку; строго соблюдать сроки осмотров и планово-предупредительных ремонтов; если загрязнение особенно велико, пересмотреть сроки осмотров и ремонтов, сократив межремонтный период и увеличив число чисток машины с выемкой ротора.

4-2-3. В обмотку попали посторонние предметы (металлическая стружка, металлическая и абразивная пыль и т. п.).

Защищать обмотки от попадания в них металлической и прочей пыли, особенно при обточке и шлифовке коллекторов и контактных колец. Для этого следует практиковать временную заклейку обмоток бумагой или плотную обвязку их какой-либо тканью.

4-2-4. Машинное помещение насыщено кислотными или щелочными парами или газами (химическая промышленность). Эти пары и газы постепенно разрушают изоляцию обмоток.

В таких помещениях следует устанавливать только закрытые машины с химически стойкой изоляцией и проточной вентиляцией, с подводом чистого воздуха извне или с внешним обдувом.

4-2-5. Сильный и длительный перегрев машины делает изоляцию машины хрупкой и гигроскопичной.

См. § 1-2, 1-3, 1-5, 2-2 — 2-5, 3-3 — 3-6.

4-2-6. Электродинамические силы, развивающиеся при коротких замыканиях, а также перенапряжения, возникающие в питающей сети и при выключениях обмоток возбуждения, могут вызвать перекрытие обмоток электрической дугой и пробой на корпус.

Усилить крепление лобовых частей обмотки, особенно на прямых участках при выходе из пазов.

В отдельных случаях — при переходах на прямой пуск двигателей — эффективной мерой является установка дополнительных бандажных колец.

4-2-7. Изоляция подвергается естественному износу (старению).

Для увеличения срока службы изоляции рекомендуется вести тщательное наблюдение за ее состоянием и периодически измерять сопротивление изоляции обмоток по отношению к корпусу, а также между электрически не связанными обмотками с тем, чтобы в необходимых случаях можно было произвести мелкий профилактический ремонт изоляции или покрыть ее лаком.

4-3. РАСПАЙКА ПАЕК В ОБМОТКАХ И БАНДАЖАХ, СИЛЬНЫЙ НАГРЕВ КОНТАКТОВ

4-3-1. Петушки в коллекторе, хомутики якорей и роторов распаялись; нарушены и другие пайки в обмотках.

А. *Пайка была выполнена недоброкачественно.*

Произвести перепайку, проверив ее качество (см. приложение 8).

Б. *Был выбран неподходящий припой — слишком легкоплавкий для данного режима пуска или работы машины.*

Для пайки петушков рекомендуется применять оловянистые припои ПОС-30, ПОС-40 и ПОС-60 (цифры указывают процентное содержание олова).

Следует отметить, что чем выше содержание олова в припое, тем он легче проникает в зазоры между спаиваемыми поверхностями, но зато температура расплавления его понижается.

Если пайки хомутиков и пайки в обмотках оказываются недостаточно теплостойкими при тяжелом режиме работы, заменить оловянистый припой широко применяемыми в ремонтной практике серебросодержащими припоями (ГОСТ 19738—74) марок ПСр3Кд на основе кадмия или ПСр2,5 на основе свинца с соответствующим содержанием серебра 3 и 2,5 % и температурами конца плавления 342 и 300 °С.

Для пайки обмоток крупных машин, а именно катушек роторов синхронных машин, стержней короткозамкнутых обмоток асинхронных машин, пусковых (демпферных) обмоток синхронных машин, можно применять также и серебряные припои с более высоким содержанием серебра, например ПСр15 (ГОСТ 19738—74), а при восстановительном ремонте соединений, подверженных в процессе эксплуатации очень высоким нагрузкам на растяжение или излом (что и подтверждается разрушением этих соединений), может оказаться целесообразным и использование припоя ПСр45 с температурой конца плавления 730 °С.

В. *Слишком велика плотность тока в месте пайки петушков или хомутиков.*

Увеличить ширину петушков или длину хомутиков.

4-3-2. Распаялись кабельные наконечники, междукатушечные соединения.

А. См. п. 4-3-1, А.

Б. *Был использован слишком легкоплавкий припой.*

Пайку оловянистым припоем заменить пайкой сереб-

росодержащим припоем (см. п. 4-3-1, Б) или контактной сваркой.

4-3-3. Распаялись проволочные бандажи.

А. См. п. 4-3-1, А.

Б. *Был использован слишком легкоплавкий припой.*

Заменить его более тугоплавким припоем (наиболее подходящим является припой ПОС-30 или ПСр3Кд).

В. *Слишком велики потери в бандажах из-за вихревых токов и гистерезиса.* Увеличенные потери в бандажах появляются из-за пропайки бандажей по всей ширине, что создает наилучший контакт между рядом лежащими проволоками. В бандажах асинхронных двигателей наибольшие потери имеют место при пуске двигателя и при его длительной работе с большим скольжением (при малой частоте вращения). В машинах постоянного тока наибольшие потерн наблюдаются при больших частотах вращения.

Производить пайку бандажей не по всей ширине, а лишь у скрепок (в небыстроходных машинах). Разделить широкие бандажи на два более узких с половинным числом витков в каждом. Между слоями многослойных бандажей (применяются в быстроходных машинах) проложить изолирующую асбестовую прокладку.

Г. *Бандажные держатели неправильно размещены между соседними бандажами* (рис. 4-1, *а*), что выражается в установке их на расстоянии полюсного деления τ; в результате такой установки держателей в образующемся контуре *а* — *б* — *г* — *в* будет индуктироваться переменная ЭДС и будет протекать переменный ток. Подобное явление, но в менее выраженной форме может иметь место при такой же неправильной установке бандажных скрепок (рис. 4-1, *б*), если бандаж пропаян только у скрепок, а не по всей его длине.

Установить бандажные держатели и скрепки на расстояние двойного полюсного деления, если это окажется допустимым с точки зрения обеспечения надежности бандажа.

Наиболее радикальным способом исключения возможности возникновения дефектов, связанных с распайкой бандажей и приведенных в п. 4-3-3, А — Г, является замена проволочных бандажей на выпечные бандажи из стекловолокнистых лент марок ЛСБ-В и ЛСБ-F (ТУ6-11-22-76). Разрушающее напряжение при растяжении при нормальной температуре 800—900 МПа, а при рабочей температуре (для лент классов В и F) 500—600 МПа.

В настоящее время в эксплуатации почти нет якорей крупных машин постоянного тока и фазных роторов асин-

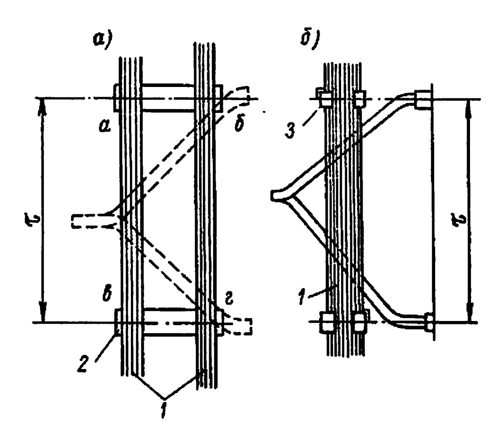


Рис. 4-1. Неправильная расстановка: *а* — держателей бандажей; *б* — скрепок на бандажах
1 — бандаж; *2* — держатель; *3* — скрепка

хронных двигателей с номинальной частотой вращения до 1500 об/мин, у которых замена проволочных бандажей на бандажи из стекловолокнистых лент была бы конструктивно невозможна или нецелесообразна.

Для выполнения этой работы или ее технической подготовки следует обратиться в конструкторскую службу завода по данному профилю электрических машин или в специализированную ремонтную организацию.

4-3-4. Сильно перегреты контакты на зажимах машины, что грозит распайкой кабельных наконечников.

А. *Гайки контактных болтов недостаточно затянуты.*

Подтянуть гайки.

Б. *Мало сечение контактных болтов.*

Увеличить сечение контактных болтов с тем, чтобы была обеспечена необходимая сила сжатия контактов; диаметр болта в миллиметрах должен быть не менее $\sqrt{I}$, где I — сила тока в амперах.

4-4. НЕИСПРАВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ. ПОПАДАНИЕ МАСЛА ВНУТРЬ МАШИНЫ

4-4-1. Перегреты подшипники скольжения [1].

А. *Недостаточна подача масла.*

[1] Предельно допустимые температуры см. в приложении 16.

У машин с кольцевой смазкой это может быть вызвано такими причинами, как защемление смазочных колец; слишком медленное их вращение, а иногда и полная остановка при работе машины из-за выбора слишком легких колец, намагничивания стальных колец, сильного сгущения масла; неправильная (некруглая) форма колец; низкий уровень масла в подшипнике.

У машин с принудительной смазкой (от масляного насоса) тот же результат получается при засорении маслопровода или масляного фильтра, при неисправности маслонасоса, при слишком малых отверстиях в каком-либо фланцевом соединении или в диафрагме напорного маслопровода, при понижении уровня масла в напорном баке.

В случае кольцевой смазки проверить состояние смазочных колец; поврежденные (погнутые) кольца выправить или заменить новыми; легкие кольца заменить более тяжелыми; стальные кольца в случае их намагничивания заменить латунными; сгустившееся масло заменить новым; проверить уровень масла по маслоуказателю.

В случае принудительной смазки проверить маслопроводы, масляный фильтр и маслонасос; проверить отверстия во фланцевых соединениях и в диафрагме маслопровода и при необходимости увеличить их до нормальных размеров.

Б. *Масло загрязнено пылью, попавшей в масляные камеры подшипников, ржавчиной от маслопроводов, а иногда остатками формовочной земли.*

Очистить и промыть всю масляную систему (маслопроводы, фильтр и пр.); очистить масляные камеры подшипников от формовочной земли и выкрасить их маслостойкой эмалевой краской; сменить масло; уплотнить подшипники.

В. *В масло попадает вода через неплотности в маслоохладителе, а в турбогенераторах — через подшипники турбины или сильно парящие уплотнения.*

Ликвидировать неплотности в маслоохладителе; не допускать сильного парения уплотнений турбины; произвести химический анализ масла.

Г. *Масло плохо охлаждается в маслоохладителе из-за недостаточного количества охлаждающей воды или слишком высокой ее температуры.*

Увеличить подачу охлаждающей воды и принять меры к снижению температуры воды, поступающей в охладитель.

Д. *Использовано масло неподходящего сорта.*

Сорт масла выбирать в соответствии с рекомендация-

ми завода-изготовителя. Выбор сорта масла см. в приложении 15.

Е. *Слишком мал зазор между шейкой вала и вкладышем или плохо пригнан вкладыш.*

Установить зазор по данным завода-изготовителя или в соответствии с приложением 12.

Измерение зазора и его регулировку см. в приложении 12.

Пригонку вкладыша следует считать удовлетворительной, если следы приработки («натиры») образовались равномерно по всей длине нижнего вкладыша на дуге 25—30°.

Ж. *Шейка вала стала шероховатой из-за разъедания ее токами в подшипниках или из-за недоброкачественного масла.*

Шейку вала прошлифовать. Мероприятия по устранению токов в подшипниках см. в приложении 9. Сделать анализ пробы масла. При неудовлетворительных результатах анализа сменить масло.

З. *Материал заливки (баббит) подшипника не соответствует условиям работы последнего; недоброкачественно выполнена заливка вкладыша.*

Перезалить вкладыш баббитом, соответствующим рекомендации завода-изготовителя.

И. *Искривлены вал или его шейки; неправильный монтаж (центровка) машины.*

Искривление вала устранить специальной правкой его. Центровку машины см. в приложении 13.

К. *Неправильно распределены нагрузки на подшипники многомашинных агрегатов (при наличии одноопорных роторов).* При неправильной центровке подобных агрегатов некоторые подшипники могут воспринимать большую нагрузку за счет разгрузки других подшипников. Более нагруженные подшипники будут перегреваться.

При правильном первоначальном монтаже агрегата этот дефект может возникнуть в процессе эксплуатации: например, при подплавлении заливки одного из подшипников вследствие ее размягчения уровень какой-либо шейки вала может понизиться, в этом случае будут перегружены подшипники, смежные с аварийным.

Перецентровать многомашинные агрегаты в соответствии с указаниями в приложении 13.

Л. *Чрезмерно велико радиальное давление на подшипник из-за слишком сильного натяжения ремня (канатов) или из-за одностороннего магнитного притяжения между ротором и статором.*

Отрегулировать натяжение ремня, канатов.

Следует отметить, что у канатной передачи натяжение примерно в два раза больше, чем у ременной; натяжение клиноременной передачи меньше натяжения обычной ременной. Поэтому подшипники машины, рассчитанной на ременную передачу, могут оказаться непригодными для канатной передачи.

Помимо подшипников, большой перегрузке может быть подвержен и вал. В некоторых случаях слишком большое давление на подшипник возникает из-за малого диаметра шкива. В подобных случаях необходимо обратиться на завод-изготовитель.

Одностороннее магнитное притяжение устранить регулировкой зазора между ротором и статором; иногда для этой цели необходимо перезалить вкладыши подшипников. Регулировку зазора см. в приложении 12.

М. *Возникло осевое давление на подшипники, вызванное сдвигом ротора* (см. § 3-17 и 4-8) *или недостаточными зазорами между торцами вкладышей подшипников и галтелями вала, препятствующими свободному тепловому расширению вала.*

Устранить осевой сдвиг ротора, обеспечить необходимые зазоры между торцами вкладышей и галтелями вала (см. приложение 12).

Повышенный нагрев подшипников может быть вызван также повышенной вибрацией ротора.

4-4-2. Из подшипника скольжения с принудительной смазкой вытекает масло.

А. *Слишком обильна подача масла; слишком велико давление масла в напорном маслопроводе; слишком мало отверстие для стока масла в нижней половине вкладыша или в сливном патрубке.*

Отрегулировать подачу масла, уменьшив отверстие диафрагмы напорного патрубка настолько, чтобы температура масла поднималась с 35—45 °С при входе не больше чем до 60—70 °С при выходе; понизить давление масла перед подшипником до предписанного заводом-изготовителем значения (обычно 25—50 кПа изб.); увеличить отверстие для стока масла в нижнем вкладыше и в сливном патрубке.

После наладки нормальной подачи и слива масла можно приступить к выяснению других причин течи масла и их устранению.

Б. *Плохо пригнаны или изношены лабиринтные уплотнения.*

Пригнать уплотнения по валу. При установке уплотнений принять меры против смятия их острых кромок. В слу-

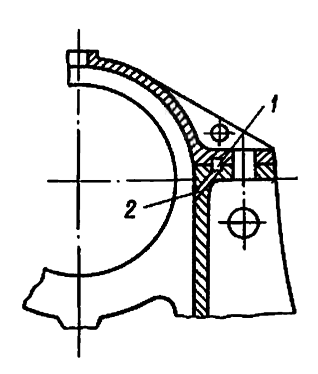


Рис. 4-2. Маслоулавливающая канавка *1* и сливное отверстие *2* в разъеме крышки и стояка подшипника

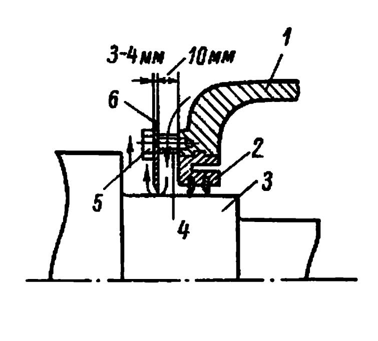


Рис. 4-3. Дополнительное уплотнение подшипника турбогенератора

1 — подшипник; *2* — существующее уплотнение; *3* — вал; *4* — дистанционная трубка; *5* — болт; *6* — латунный диск

чае значительного износа уплотнений поставить новые.

В. *Масло просачивается в стыке крышки и стояка подшипника, в стыке верхних и нижних частей лабиринтных уплотнений или через неплотности в верхних частях маслоулавливающих козырьков.*

Промазать стыки бакелитовым лаком или нанести полоску белил. Для устранения дефекта рекомендуется прорубить маслоулавливающие канавки *1* (рис. 4-2) как в крышке, так и в стояке подшипника; размер канавки не менее 8 × 6 мм; канавки в обеих частях должны совпадать и иметь острые края. В подшипниковом стояке должны быть просверлены сливные отверстия *2* диаметром 6—8 мм.

Проверить плотность установки маслоулавливающих козырьков.

Г. *Число лабиринтных уплотнений недостаточно, или же плоха их конструкция.*

Установить дополнительные лабиринтные уплотнения или заменить существующие другими, более совершенными. Уплотнения могут быть в случае надобности установлены с обеих сторон подшипника.

Простейшее дополнительное уплотнение для устранения вытекания масла и выхода масляных паров из подшипника турбогенератора показано на рис. 4-3. Оно представляет собой латунный или медный диск, состоящий из

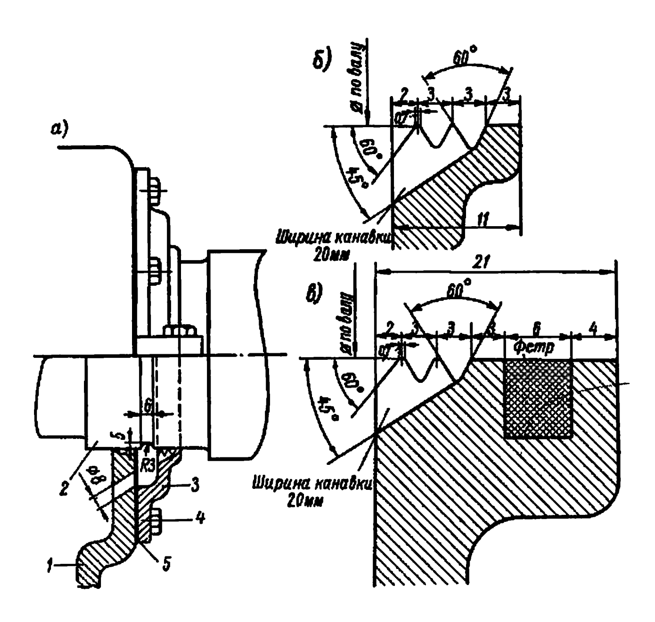


Рис. 4-4. Уплотнение подшипника: *а* — установка уплотнения; *б* — основные размеры уплотнения; *в* — установка дополнительного фетрового кольца

1 — корпус подшипника; *2* — вал; *3* — уплотнение; *4* — болт; *5* — уплотняющая прокладка

двух частей, прикрепленных к подшипнику при помощи болтов с дистанционными трубками. Если этого уплотнения нет, то воздух, находящийся в пространстве между подшипником и торцом утолщения вала, получает вращательное движение и под влиянием центробежной силы выбрасывается, создавая некоторое разрежение, способствующее просачиванию масла и масляных паров через существующее уплотнение. При наличии же дополнительного уплотнения воздух циркулирует, как показано стрелками, и не засасывает масло из уплотнений. Кроме этого, на дополнительном уплотнении конденсируются масляные пары.

Более сложная конструкция уплотнения показана на рис. 4-4, *а* и *б*. Уплотнение отливают из бронзы, латуни или алюминиевого сплава, его делают разъемным по горизонтальному диаметру. На валу протачивают канавку для отбрасывания масла, попадающего на вал между подшипником и уплотнением. В стенке подшипника просверливают отверстия для стока масла обратно в под-

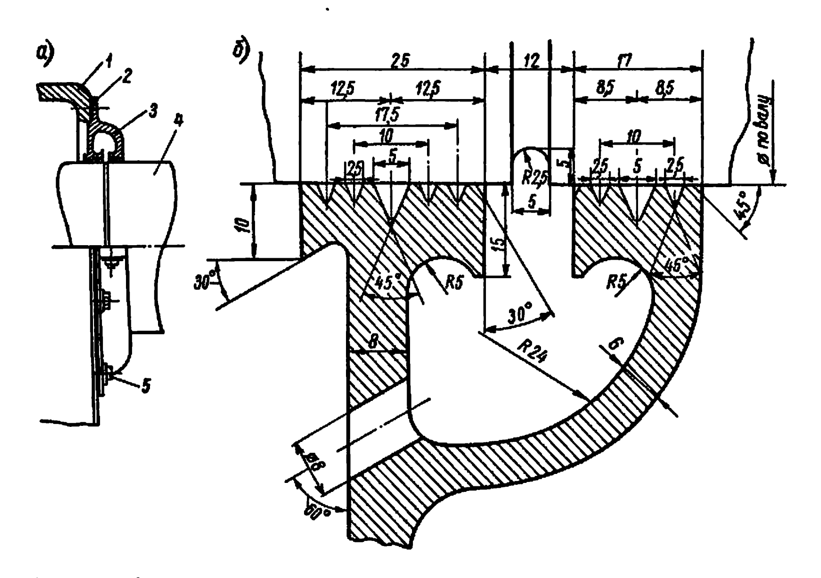


Рис. 4-5. Алюминиевое уплотнение подшипника: *а* — установка уплотнения; *б* — основные размеры уплотнения

1 — подшипник; *2* — уплотняющая прокладка; *3* — уплотнение; *4* — вал; *5* — болт

шипник; для удаления масла, попадающего в уплотнение, в последнем выфрезеровывают канавку шириной 20 мм. Такое уплотнение можно улучшить, если в специально проточенную для этой цели канавку в лабиринтном уплотнении установить дополнительное уплотняющее кольцо из фетра или из высококачественного войлока (рис. 4-4, *в*).

Фетровые уплотнения не следует применять при больших окружных скоростях вала; предел окружной скорости зависит главным образом от качества обработки трущейся части вала. Необходимо иметь в виду, что при грубой обработке вала фетр быстро изнашивается, а при чрезмерно больших окружных скоростях может сгореть. Поэтому фетровые уплотнения не следует применять при окружных скоростях вала, превышающих 6—7 м/с, даже если этот вал отполирован самым тщательным образом. Указанные соображения заставляют следить и за тем, чтобы фетр не был слишком сильно прижат к валу.

Другая, более совершенная конструкция лабиринтного уплотнения показана на рис. 4-5. Его делают из алюминиевого сплава, разъемным по осевой горизонтальной

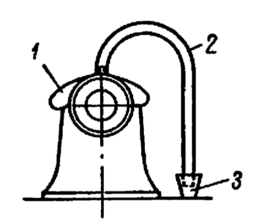


Рис. 4-6. Отвод масляных паров из подшипника
1 — крышка подшипника; 2 — изогнутая труба; 3 — сосуд

плоскости. На валу имеется маслосбрасывающий гребень или маслосбрасывающая канавка. Подобные уплотнения в настоящее время широко применяются электромашиностроительными заводами. При правильной сборке их и надлежащих зазорах эти уплотнения гарантируют весьма надежную работу.

Независимо от конструкции зазор между уплотнением и валом должен быть 0,10—0,15 мм.

Д. *Повышенное давление масляных паров внутри подшипника способствует выходу паров через зазор между валом и уплотнением.*

Чтобы снизить давление внутри подшипника и отвести образующиеся пары, в верхнюю часть крышки ввертывают газовую трубку (рис. 4-6) диаметром 12—25 мм, для чего в крышке нарезают трубную резьбу. Трубку отгибают книзу, и конец ее вводят в сосуд, куда собирается конденсирующееся масло.

4-4-3. Из подшипника с кольцевой смазкой вытекает масло.

А. *Слишком обильна смазка; уровень масла выше указанного по маслоуказателю, вследствие чего масло течет вдоль вала.*

Наливать масло в подшипники только при неподвижной машине, так как при вращении уровень масла в маслоуказателе понижается вследствие того, что смазочные кольца забирают часть масла.

Об уровне масла судить по контрольной черте на маслоуказателе, имеющемся на каждом подшипнике. При отсутствии черты на маслоуказателе руководствоваться тем, что смазочное кольцо должно быть погружено в масло на $^1/_4$—$^1/_5$ своего диаметра. Наливать масло постепенно, так как уровень вследствие вязкости масла устанавливается не мгновенно.

Б. *Слишком малы размеры отверстий для стока масла в нижней части вкладыша (в кольцевых канавках у торца вкладыша).*

Увеличить диаметр отверстий для стока масла или же увеличить их число.

В. *Слишком велико вентилирующее действие вращающихся*

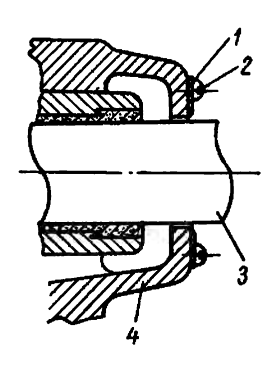


Рис. 4-7. Уплотнение подшипника латунной шайбой

1 — латунная шайба; *2* — винт; *3* — вал; *4* — подшипник

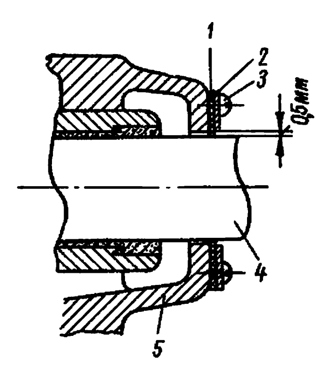


Рис. 4-8. Уплотнение подшипника стальной и кожаной шайбами

1 — кожаная шайба; *2* — стальная шайба; *3* — винт; *4* — вал; *5* — подшипник

частей машины, вследствие чего воздух продувается через подшипник и прогоняет масло по валу.

Установить дополнительные уплотнения. Во многих случаях можно ограничиться установкой уплотнений, менее сложных, чем те, которые показаны на рис. 4-4 и 4-5. На рис. 4-7 показано простейшее уплотнение, состоящее из латунной шайбы толщиной 2 мм, прикрепленной к корпусу подшипника при помощи винтов. Шайба имеет заостренный край, и ее плотно пригоняют к валу. На рис. 4-8 показано уплотнение, состоящее из стальной шайбы толщиной 1—2 мм, с зазором между шайбой и валом 0,5 мм. Между этой шайбой и подшипником помещают кожаную шайбу. Последнюю можно заменить фетровым уплотнением с медной крепящей шайбой, устанавливаемой без зазора между ней и валом.

4-4-4. Масло или масляные пары попадают внутрь машины.

А. *Масло или масляные пары засасываются из подшипников внутрь машины вентилятором машины или вследствие вентиляционного действия ротора.*

Засасывание масла бывает особенно сильным в закрытых машинах с щитовыми подшипниками, когда последние частично расположены внутри машины. В этом случае вентилятор находится близко к подшипнику. Если налицо указанные выше дефекты в уплотнениях, то разрежение, создаваемое работающим вентилятором, ведет к интенсивному засасыванию масла внутрь машины.

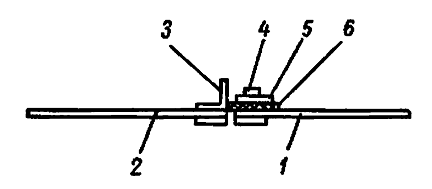


Рис. 4-9. Уплотнение стыков между частями щитов статора
1 и *2* — части щита; *3* — отрезок угловой стали; *4* — винт; *5* — стальная полоса; *6* — фетр

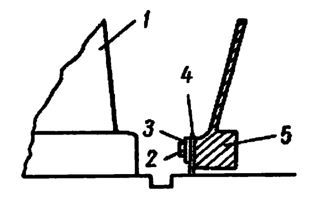


Рис. 4-10. Устройство, предотвращающее попадание масла внутрь машины
1 — подшипник; *2* — винт; *3* — стальная полоса; *4* — фетр; *5* — щит

Устранить дефекты в подшипниках (см. пп. 4-4-2 и 4-4-3).

Б. *Масло, вытекающее из стояковых (выносных) подшипников, расположенных близко к щиту, засасывается внутрь закрытой машины по валу и через неплотности между щитом и фундаментной плитой.*

Установить, помимо описанных выше уплотнений в подшипниках, еще и так называемое воздушное уплотнение на щите, представляющее собой камеру, опоясывающую вал и соединяемую при помощи трубы с областью повышенного давления внутри машины.

Некоторые типы быстроходных машин, например турбогенераторы, снабжаются в настоящее время подобными уплотнениями, причем канал, подводящий воздух к уплотнению, расположен в вертикальных стыках щитов статора в виде канавок, имеющихся в обеих частях щитов.

Между валом и лабиринтным уплотнением в щите корпуса статора закрытой машины зазор должен быть 0,1—0,2 мм.

Чтобы предотвратить попадание масляных паров в закрытые машины, необходимо уплотнить стыки между частями статорных щитов, а также между фундаментной плитой и щитами, воспользовавшись для этого суриковой или глетовой замазкой. Можно также в стыке между частями щитов установить уплотнение, например типа, показанного на рис. 4-9, а в стыке между фундаментной плитой и щитами поставить уплотнение, аналогичное показанному на рис. 4-10. Масло, попадающее на плиту возле щита, будет скапливаться в канавке и может быть из нее легко изъято. Кроме этого, в нижней части щита пристраивают уплотнение, состоящее из фетра, поверх которого накладывают стальную полосу шириной 30—

40 мм и толщиной 3—4 мм. Стальную полосу и фетр прикрепляют к щиту винтами.

Отметим, что указанная неисправность встречается главным образом в турбогенераторах старых выпусков, в которых внизу щита обычно имеется воздушное уплотнение. Внутрь современных машин масло благодаря конструктивным улучшениям попадает относительно редко.

В. *Внутрь машины засасываются масляные пары от других машин, находящихся в машинном помещении (например, от редукторов, соединяющих электрические машины с другими машинами).*

Некоторые технологические процессы, например холодная прокатка ряда сортов стали, иногда сопровождаются обильным выделением масляных паров, которые могут засасываться приводными электродвигателями, находящимися в производственном помещении.

Необходимо тщательным наблюдением выяснить источник образования масляных паров. Устранить дефекты в подшипниках всех машин в соответствии с указаниями в пп. 4-4-2 и 4-4-3. Уплотнить корпуса редукторов: устранить неплотности в щитах статора и в их лабиринтных уплотнениях в соответствии с указаниями в п. 4-4-4, Б; установить или усилить вытяжную вентиляцию в машинном или производственном помещении.

Если же принятые меры не дадут положительного результата для машины открытого типа, ее следует заменить машиной закрытого типа или же переделать в машину закрытого типа, обратившись за рекомендацией по этому вопросу к заводу-изготовителю.

В наиболее сложных случаях единственным мероприятием, могущим устранить попадание масляных паров как в открытую, так и в закрытую машину, часто является выгораживание отдельного помещения либо для нее, либо для другой машины (редуктора), являющейся источником масляных паров.

4-5. НЕИСПРАВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

4-5-1. Подшипник перегревается.

А. *Подшипник загрязнен пылью или какими-либо другими мелкими частицами; загрязнена и смазка.*

Удалить из подшипника старое масло, промыть его и заложить новую смазку.

Б. *Избыток смазки в подшипнике (особенно в быстроходных машинах) вызывает повышенные потери на трение в нем.*

Уменьшить количество смазки.

В. *Слишком велико трение между уплотняющей набивкой и валом.*

Проверить правильность установки набивки и в случае необходимости ослабить плотность набивки или заменить ее новой.

Г. *В подшипнике отсутствуют осевые зазоры, необходимые для компенсации температурного удлинения вала.* Например, внешнее кольцо упирается в крышку подшипника, либо слишком туга посадка внешнего кольца подшипника в подшипниковом щите. В этих случаях увеличивается осевое давление в подшипнике, что не только вызывает перегрев, но и грозит повреждением подшипникового узла. При этой неисправности ротор легко проворачивается в холодном подшипнике и его «заедает» в нагретом.

Установить необходимые осевые зазоры (см. приложение 12) либо с помощью прокладок между крышкой подшипника и его корпусом, либо соответствующей проточкой крышки подшипника. При слишком тугой посадке внешнего кольца слегка расшабрить посадочное место в подшипнике.

Д. *Изношены или разрушены детали подшипника.*

Заменить подшипник новым.

Е. *Слишком велика нагрузка на подшипник (неправильно выбран подшипник); слишком туго натянут передаточный ремень.*

Проверить соответствие подшипника заводским данным. Ослабить натяжение ремня.

Ж. *Подшипник неправильно установлен; центровка электрической машины с другой, сопряженной с ней машиной произведена плохо.*

Проверить установку подшипников и центровку машин (см. приложение 13).

4-5-2. Из подшипника выбрасывается масло.

А. *В подшипнике слишком много смазки.*

Уменьшить количество смазки.

Б. *Выбран несоответствующий сорт смазки — слишком низка температура ее каплепадения.*

Проверить соответствие марки смазки, рекомендуемой заводом, и при необходимости заменить ее смазкой с более высокой температурой каплепадения. Выбор марки смазки см. в приложении 15.

В. *Сработались уплотнения, или же неудачна их конструкция.*

Сменить уплотняющий элемент или заменить уплот-

нение более совершенным (например, по типу рис. 4-4, *в*).

4-5-3. В подшипнике возникает ненормально сильный шум, часто сопровождающийся повышением температуры подшипника.

А. *Подшипник загрязнен.*

Удалить старое масло, промыть подшипник керосином и заложить новую смазку.

Б. *Сепаратор задевает за сопряженные с подшипником детали.*

Вскрыть подшипник и устранить задевание.

В. *Подшипник чрезмерно изношен, дорожки и тела качения выкрашиваются.*

Вскрыть подшипник, проверить зазоры между телами качения и наружным кольцом (см. приложение 12), осмотреть дорожки и тела качения. В случае повышенного износа или повреждения заменить подшипник новым.

Г. *Дефекты в сопряженных машинах агрегата или в зацеплении порождают удары и толчки; плоха центровка машин.*

Проверить все узлы агрегата, устранить обнаруженные дефекты, проверить центровку (см. приложение 13).

Д. *Внутреннее кольцо подшипника неплотно сидит на валу.*

Заменить подшипник новым, с меньшим внутренним диаметром, предварительно проточив вал.

4-6. ВИБРАЦИЯ МАШИН

Вибрация электрических машин вызывается неуравновешенностью вращающихся частей, механическими неисправностями или причинами электромагнитного характера. В п. 4-6-3 рассматриваются некоторые способы выявления причины вибрации. Допустимую вибрацию см. в приложении 12.

4-6-1. Неуравновешены вращающиеся части.

А. *Неуравновешены ротор, муфта, шкив.*

Дополнительно отбалансировать ротор (см. приложение 14). Большие шкивы или муфты (если они имеются), которые могут быть причиной вибрации, снять и отбалансировать отдельно от ротора. Добавочные маховики, например у дизель-генератора, подвергнуть отдельной балансировке.

Б. *У машины, некоторое время проработавшей нормально, сместилась обмотка ротора вследствие ее недостаточной опрессовки или слабой бандажировки (это наблюдается большей частью у быстроходных машин)*, а также в случае имевшего место сильного повышения частоты вращения, например, вследствие неисправности регулятора первичного двигателя.

Если смещение обмотки в дальнейшем не наблюдается, то вибрацию машины можно устранить дополнительной балансировкой ротора (см. приложение 14). Если же после произведенной дополнительной балансировки смещение обмоток продолжается и вновь появляется вибрация, то необходимо снять бандажи, укрепить обмотку и установить более надежные бандажи.

В. *Посадка роторной обмотки ослаблена вследствие усыхания изоляции.* Это случается большей частью в полюсных катушках синхронных машин с явно выраженными полюсами.

Укрепить обмотку посредством прокладки дополнительной изоляции, тщательной опрессовки и затяжки. Способы укрепления обмотки зависят от конструкции машины. После укрепления обмотки почти всегда требуется дополнительная балансировка ротора (см. приложение 14).

4-6-2. Имеются механические неисправности.

А. *Неправильно центрирован агрегат, состоящий из нескольких машин.* Следует учесть, что некоторые агрегаты, правильно сцентрированные в холодном состоянии, могут расцентрироваться в рабочем состоянии вследствие деформации опор, фундамента и т. д. (см. приложение 13).

Проверить центровку валов (см. приложение 13) и в случае надобности исправить ее.

Б. *Недостаточно закреплены вращающиеся части на валу, например ротор, шкив, маховик и пр. Недостаточен натяг или ослабла посадка бандажей (капп) ротора турбогенератора на бочке или на центрирующем кольце, а также центрирующего кольца на валу.* Признаками этой неисправности служат: появление контактной коррозии (на посадочных местах появляются налеты ржавчины), возрастание вибрации с течением времени. Последнее объясняется прогрессирующим характером неисправности.

В относительно тихоходных машинах небольшой мощности этот дефект иногда может быть устранен более плотной установкой клиновой шпонки, если она предусмотрена конструкцией.

Более радикальным методом является расточка отверстия в роторе, шкиве и пр., последующая наварка слоя стали и обработка с допусками, обеспечивающими необходимую посадку на валу. В некоторых случаях может быть установлена после расточки промежуточная втулка. В ответственных и сложных случаях необходимо обратиться за консультацией на завод-изготовитель.

В. *Имеются дефекты в зубчатых передачах вследствие не-*

правильного зацепления, несоответствующей обработки зубьев и т. д.

Отремонтировать или заменить зубчатую пару.

Г. *Неудовлетворительное сращивание приводных канатов и ремней привело к появлению на них недопустимых утолщений; неправильно расположены сшивки по отношению к направлению вращения шкивов, в результате чего сшивки ударяют о шкив при набегании на него.*

Улучшить сращивание канатов или ремней; сшить ремень так, чтобы было достигнуто безударное набегание сшивок на шкив.

Д. *Лабиринтные уплотнения подшипников или маслоулавливающих колец задевают за вал.*

Пригнать уплотиения или кольца по валу, обеспечив предписанный зазор.

Е. *Неисправна соединительная муфта. Между полумуфтами, неправильно насаженными на вал, имеется перекос. Одна или обе полумуфты бьют. Пальцы неправильно установлены в пальцевой муфте или изношены. Неравномерно изношены или поражены коррозией кулачки или звездочки в кулачковых муфтах.*

Проверить правильность насадки и биение обеих полумуфт (см. приложение 12); проверить установку пальцев в полумуфтах. В случае необходимости устранить повышенное биение полумуфт, исправить установку пальцев или заменить их новыми (иногда бывает достаточно поменять пальцы местами или просто повернуть их в своих гнездах); отремонтировать кулачковую муфту.

Ж. *Шейки вала приобрели овальную форму; вал искривлен.*

Проверить биение вала и его шеек (см. прнложение 12). Овальность шеек исправить проточкой или шлифовкой. Искривление вала устранить специальной правкой (механическим или термическим способами).

З. *Слишком мал или слишком велик зазор между шейками вала и вкладышами.*

Установить зазоры между шейками вала и вкладышами в соответствии с данными завода-изготовителя, а при отсутствии их — по разделу Б приложения 12.

Обратить внимание на то, чтобы сопряжение вкладыша с корпусом подшипника соответствовало чертежу, так как чрезмерный (более 0,05 мм) зазор между вкладышем и крышкой подшипника может быть причиной повышенной вибрации подшнпника даже при нормальном зазоре во вкладыше.

И. *У быстроходных машин при неправильно выбранном зазоре между шейкой вала и вкладышем может возникнуть*

«масляное биение» [13]. Вал при этом приподнимается гидродинамическими силами, возникающими в масляном клине между валом и вкладышем, и перемещается по замкнутому пути в направлении вращения; это явление периодически повторяется. Число возникающих при этом колебаний не совпадает с частотой вращения ротора, обычно оно меньше половины частоты вращения ротора. Колебания зависят от частоты вращения вала, величины зазора во вкладыше, массы и гибкости ротора, имеющейся хотя бы незначительной неуравновешенности последнего и от вязкости масла, а так как вязкость сильно зависит от температуры, то также от температуры масла и подшипников. Поэтому если при повышении температуры масла вибрация уменьшается или совершенно исчезает, то можно с уверенностью сказать, что причиной вибрации является неправильно выбранный зазор между шейкой и вкладышем.

Увеличить шабровкой боковые зазоры во вкладыше, вплотную к его приработанной части, с целью расширения масляного клина.

К. *Слишком низка температура масла, входящего в подшипник при принудительной смазке.*

Следить за тем, чтобы температура входящего масла перед пуском машины была не ниже 30 °С, а во время работы машины 35—40 °С.

Л. *Недостаточна жесткость подшипниковых стояков, фундаментной плиты, фундамента в целом или отдельных его частей.* Возможно появление резонансных колебаний.

Необходимы конструктивные мероприятия. Предварительно надо убедиться в том, что другие причины вибрации отсутствуют. Обратиться за консультацией на завод-изготовитель.

М. *Машина недостаточно прочно закреплена на фундаменте; ослабла затяжка анкерных болтов или болтов крепления подшипниковых стояков к фундаментной плите; неправильно размещены монтажные клинья между фундаментной плитой и фундаментом, или недостаточно их число; неправильно залита фундаментная плита.*

Проверить затяжку анкерных болтов и болтов крепления подшипниковых стояков; проверить монтаж машины. В случае необходимости установить дополнительные клинья и вновь залить фундаментную плиту соответствующим цементным раствором.

Н. *Машине передаются вибрации от других машин агрегата при их жестком соединении* (например, от паровой турбины, двигателя внутреннего сгорания или же от приводимой машины, например от компрессора, вентилятора и пр.).

Выяснить причины вибрации других машин агрегата и устранить их.

Проверить центровку валов и состояние соединительных муфт; в случае надобности отбалансировать роторы других машин агрегата.

Если трудно выявить причины вибрации агрегата, следует разобщить соединенные между собой машины и пустить электрическую машину вхолостую в качестве двигателя. Спокойная работа машины покажет, что причина вибрации находится вне ее.

О. *Фундамент машины колеблется вследствие передачи вибрации от соседних машин через строительные связи фундамента с фундаментами других машин, со стенами здания или с перекрытием пола машинного помещения.*

Реконструировать фундамент.

П. *Неравномерная осадка фундамента нарушила правильную установку машины и центровку агрегата.*

Выверить установку машины и проверить центровку агрегата (см. приложение 13).

Р. *Машина резонирует со своим фундаментом.* Если число собственных колебаний фундамента совпадает с числом колебаний машины (агрегата), то вибрация появляется только при определенной частоте вращения и особенно вредна, если эта частота вращения совпадает с номинальной частотой вращения машины.

Собственные колебания фундамента можно определить следующим образом. Устанавливают на фундаменте небольшой двигатель постоянного тока, допускающий регулировку частоты вращения в возможно больших пределах, и дают ему работать при различной частоте вращения. Предварительно его якорю придают искусственную неуравновешенность установкой на нем небольшого добавочного груза. Если при номинальной частоте вращения агрегата возникают резонансные колебания фундамента, то это показывает, что причиной вибрации агрегата является резонанс.

Тщательно отбалансировать ротор и увеличить жесткость фундамента. Если наибольшие вибрации возникают при частоте вращения, лежащей ниже рабочего диапазона частот вращения, то при пуске машины следует как можно быстрее проходить частоту вращения, при которой наблюдается повышенная вибрация.

С. *Резонируют отдельные части машины, когда частота их собственных колебаний совпадает с частотой вращения ротора.* Эти явления могут наблюдаться в щитовых и стояковых под-

шипниках, щитах статора, фундаментальной плите, щеточной траверсе и пр.

Изменить жесткость резонирующих частей, внеся конструктивные изменения, например приварив ребра жесткости.

Т. *У некоторых крупных машин постоянного тока иногда внезапно появляются значительные вибрации траверсы, вызывающие сильное искрение на коллекторе вплоть до появления кругового огня.* Это происходит из-за неустойчивости силы трения между коллектором и щетками данной марки. Изменение коэффициента трения, например вследствие изменения температуры, влажности окружающего воздуха, нагрузки и пр., изменяет также и частоту колебаний щеткодержателей; колебания последних и могут вызвать резонансные колебания траверсы.

Вибрации, возникающие по указанной причине, могут быть временно устранены, если слегка смазать поверхность коллектора парафином (провести парафиновой свечой по образующей коллектора); благодаря этому мгновенно меняются условия трения и вибрации затухают. Это явление может быть радикально устранено подбором щеток соответствующей марки.

У. *Частота вынужденных колебаний при номинальной частоте вращения ротора машины совпадает с собственной частотой колебаний системы ротор — опоры.* Такое совпадение может быть при неудачном расчете ротора.

Обратиться за консультацией на завод-изготовитель.

Ф. *Различна жесткость ротора турбогенератора по двум его осям.* Вибрации по этой причине наблюдаются в крупных двухполюсных турбогенераторах. Различие в жесткости ротора вызывается наличием в нем больших зубцов (рис. 4-11). Наименьший прогиб бывает при вертикальном расположении оси больших зубцов, а наибольший — при ее горизонтальном расположении. В связи с этим за один оборот происходят два полных цикла изменения статического прогиба, т. е. при вращении ротора наблюдается вибрация его с двойной частотой вращения.

Такую вибрацию можно устранить только конструктивными изменениями ротора, что в эксплуатации неосуществимо. Как показал опыт, величина этих вибраций благодаря конструктивным мероприятиям, осуществляемым заводами-изготовителями, находится в большинстве случаев в допустимых пределах.

4-6-3. Возникли ненормальные электромагнитные явления.

А. *Соединения в обмотке статора машины переменного тока сделаны неправильно.*

Рис. 4-11. Сечение ротора турбогенератора

См. п. 2-7-12, А.

Б. *Короткое замыкание в фазном роторе асинхронного двигателя. Машина вибрирует с частотой скольжения.*

См. п. 2-5-3.

В. *Междувитковое соединение или замыкание на корпус в двух местах обмотки возбуждения синхронной машины.*

См. § 3-6, п. В.

Г. *Катушки полюсов синхронных машин неправильно соединены между собой.*

Проверить полярность полюсов и исправить неверные соединения катушек (см. приложение 2).

Д. *Обрыв в стержнях ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя.*

См. п. 2-5-2, Е.

Е. *Обрыв в демпферных стержнях синхронных машин (проявляется главным образом при нагрузке двигателя).*

См. п. 2-5-2, Е.

Ж. *Сталь ротора (якоря) деформирована или имеет биение, вследствие чего зазор между статором и ротором при вращении ротора постоянно меняется, магнитный поток в зазоре становится несимметричным, появляется вращающаяся сила одностороннего притяжения между ротором и статором, вызывающая изгиб вала или колебательные движения статора при недостаточно жесткой конструкции последнего.* В асинхронных двигателях, где зазор относительно мал, может произойти задевание ротора за сталь статора.

Обточить ротор (якорь) или отшлифовать его наждачным кругом. Следует иметь в виду, что увеличение зазора между статором и ротором в асинхронном двигателе ухудшает его коэффициент мощности.

З. *В асинхронном двигателе имеют место вибрации из-за неудачного соотношения чисел зубцов статора и ротора.*

См. п. 2-9-3.

И. *Очень велика неравномерность зазора между ротором и статором.* При этом возникают вибрации двойной частоты вращения. Неравномерность зазора в пределах, указанных в приложении 12, не может служить причиной вибрации.

Отрегулировать зазор между ротором и статором (см. приложение 12).

К. *Корпус статора крупного турбогенератора вибрирует из-за того, что электромагнитные силы, приложенные к статору,*

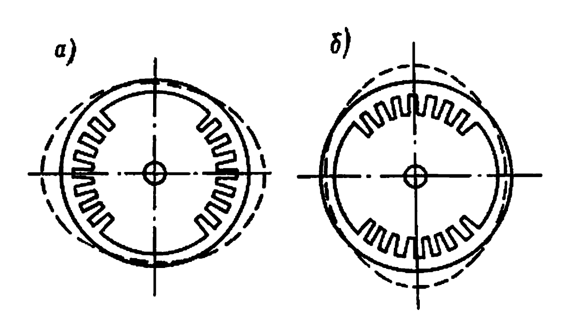


Рис. 4-12. К объяснению причин возникновения вибраций двойной частоты

стягивают круглое кольцо активной стали статора по оси полюсов и деформируют его в эллипсоидальное. Этот дефект наблюдается при недостаточной жесткости корпуса статора. При этом диаметр расточки уменьшается вдоль оси полюсов (оси больших зубцов) и увеличивается вдоль поперечной оси. На рис. 4-12, *а* изображено сечение ротора при вертикальном, а на рис. 4-12, *б* — при горизонтальном расположении оси полюсов. За один оборот двухполюсного ротора радиальное смещение каждой точки статора проходит два полных цикла, т. е. рассматриваемая точка вибрирует с двойной частотой вращения ротора.

Вибрации могут быть уменьшены лишь различными конструктивными мероприятиями.

Л. *Слишком велика несимметрия нагрузки турбогенератора.*

Снизить несимметрию до допускаемых пределов (см. п. 3-8-4).

Во многих случаях можно легко определить, является ли вибрация следствием неуравновешенности, механической неисправности или электромагнитных явлений. Рассмотрим в качестве примера один из способов установления причины повышенной вибрации двигателя или генератора.

Двигатель отключают от сети и проверяют вибрацию его в то время, когда его частота вращения практически еще не успела понизиться. Генератор возбуждают до номинального напряжения при номинальной частоте вращения. Если при отключении двигателя от сети или при снятии возбуждения с генератора вибрации исчезают, то можно считать, что они вызываются электромагнитными причинами.

Определение частоты вибрации также часто помогает выявить ее причину. Овальность шеек вала вызывает

вибрации двойной частоты вращения. Если причиной вибрации является «масляное биение» (см. п. 4-6-2, И), то частота вибрации при этом меньше половины частоты вращения. Неуравновешенность вращающихся частей вызывает вибрацию с частотой вращения.

4-7. НЕНОРМАЛЬНЫЙ ШУМ В МАШИНАХ

4-7-1. Слаба запрессовка активной стали, что можно обнаружить по значительной вибрации корпуса статора, спинки активной стали, а также по специфическому шуму, издаваемому работающей машиной. Пульсации магнитного потока вызывают вибрацию листов активной стали и интенсивное развитие контактной коррозии, характеризующейся наличием мелкого порошка ржавчины.

Общее сильное ослабление зоны активной стали требует полной переборки последней. При местных ослаблениях зоны активной стали все неблагополучные места уплотнить забивкой гетинаксовых или бакелитовых клиньев.

4-7-2. Повреждены или неисправны обмотки; несимметрично распределены катушечные группы при наличии параллельных ветвей.

См. пп. 2-4-2; 2-7-12, А; 2-9-1, В и 2-9-2.

4-7-3. Машина или ее отдельные части вибрируют.

См. § 4-6 и приложение 14.

4-7-4. Неблагоприятные условия поступления воздуха в вентиляционные каналы быстроходных и сильно вентилируемых машин, например, при наличии острых краев, изогнутых вентиляционных путей и резких изменений их сечения. Звуковые колебания могут также возникнуть из-за колебаний воздуха в пустых пространствах, щелях или каналах (как у сирены).

Вентиляционный шум можно уменьшить конструктивными мероприятиями, требующими капитальной переделки машины, например применением вентиляторов и щитов специальной конструкции, уменьшающих вихреобразование. Необходимо обратиться за консультацией на завод-изготовитель.

4-7-5. Вибрируют дистанционные распорки (ветреницы) в пакетах стали; вибрируют крайние листы стали; разбухли или ослабли клинья в пазах; выступила изоляция (отклеилась лента, отстал электрокартон и т. п.).

Вибрацию дистанционных распорок и крайних листов стали можно устранить забивкой в них гетинаксовых или текстолитовых клиньев. Разбухшие клинья подстрогать

или опилить; ослабшие клинья заменить новыми; выступающую изоляцию подрезать.

4-7-6. Имеются дефекты в подшипниках качения.

См. § 4-5.

4-7-7. Неудачен выбор числа пазов статора и ротора асинхронных двигателей.

См. п. 2-9-3.

4-8. ОСЕВОЙ СДВИГ И ОСЕВЫЕ КОЛЕБАНИЯ РОТОРА

Осевые сдвиги и осевые колебания ротора (якоря) наблюдаются главным образом при эластичных муфтах. При жестких муфтах осевым сдвигам может препятствовать другая машина агрегата.

4-8-1. Ротор (якорь) смещен в сторону одного из подшипников. При возбуждении вращающегося генератора или при пуске двигателя в ход происходит устойчивое смещение ротора (якоря) до упора в сторону одного из подшипников, которое сохраняется при холостом ходе и при нагрузке. Ротор (якорь) вращающегося невозбужденного генератора или двигателя при выбеге имеет нормальный осевой разбег в обе стороны.

Несовпадение магнитных осей статора (магнитной системы) и ротора (якоря) из-за неправильной установки статора (магнитной системы).

Установить статор (магнитную систему) в такое положение, чтобы при холостом ходе и при нагрузке генератора или двигателя ротор (якорь) имел равномерный разбег в обе стороны. Такое положение соответствует совпадению магнитных осей статора и ротора (рис. 4-13). Для этого следует передвинуть статор (магнитную систему) в сторону, противоположную сдвигу ротора (якоря).

4-8-2. Осевой сдвиг ротора (якоря) появляется после некоторого периода нормальной работы машины. Сдвиг ротора (якоря) непостоянен: иногда усиливается или уменьшается, иногда совершенно исчезает, а затем появляется вновь. В некоторых случаях появляются осевые колебания ротора (якоря), увеличивающиеся при уменьшении нагрузки и достигающие наибольшей величины при холостом ходе генератора или при выбеге ротора двигателя, т. е. при отсутствии электромагнитных сил, приложенных к ротору (якорю).

А. *Нарушена центровка агрегата, например, вследствие неравномерой осадки фундамента, износа подшипников и пр.*

Проверить и исправить центровку агрегата (см. приложение 13).

Отремонтировать подшипники и установить нормаль-

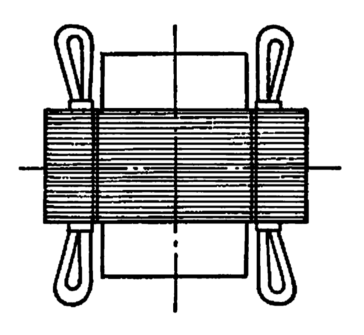


Рис. 4-13. Совпадение магнитных осей статора и ротора

ный зазор между шейками вала и вкладышами подшипников (см. приложение 12).

Б. *Неравномерно сработались соприкасающиеся части в кулачковой, пальцевой или пружинной муфтах. Недостаточна смазка. Имеют место коррозия, заедание в соприкасающихся частях полумуфт, забоины, заусенцы на рабочих поверхностях кулачковых и пружинных муфт.*

При всех этих неисправностях появляется осевое усилие, сдвигающее ротор. Так, при неравномерном срабатывании рабочих поверхностей кулачковой муфты происходит их скашивание (рис. 4-14) и они становятся непараллельными оси вращения. В этом случае сила P, действующая между полумуфтами, не будет перпендикулярна оси вращения. Эту силу можно разложить на две составляющие, из которых сила N будет перпендикулярна оси вращения, а сила T — параллельна этой оси. Сила T и производит осевой сдвиг ротора.

Тщательно очистить соприкасающиеся поверхности полумуфт от ржавчины, устранить забоины и заусенцы. Пригнать кулачки в кулачковой муфте. В случае повышенного износа зубцов пружинной муфты заменить ее.

Следует отметить, что осевой сдвиг и осевые колебания ротора (якоря) электрической машины могут быть вызваны неисправностью приводного двигателя или приводимого механизма. Чтобы в сомнительных случаях безошибочно определить причину неисправности, следует разъединить машины агрегата и пустить в ход только электрическую ма-

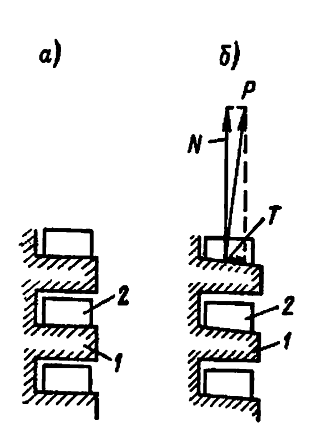


Рис. 4-14. Положение рабочих поверхностей кулачков, звездочек и полумуфт: *а* — в нормальных условиях; *б* — при скошенных рабочих поверхностях

1 — кулачок полумуфты; *2* — кулачок звездочки

шину. Нормальная работа одиночной электрической машины показывает, что причина сдвига ротора (якоря) находится не в ней.

Если сдвиг ротора (якоря) является следствием несовпадения магнитных осей статора и ротора (якоря), то он будет наблюдаться и при работе одиночной электрической машины.

О причинах осевого сдвига ротора турбогенератора см. в § 3-17.

4-9. НЕИСПРАВНОСТИ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

4-9-1. Воздухоохладитель засорился, что наблюдается и при наличии фильтра, так как последний практически не дает полной очистки охлаждающей воды.

Различные отложения на стенках трубок уменьшили их сечение. При этом увеличился температурный перепад между водой и стенками трубок, что ухудшило работу охладителя.

При этой неисправности увеличивается нагрев воды охладителя (при определенной нагрузке машины), уменьшается расход воды и увеличивается разность между температурой охлажденного воздуха и холодной воды, поступающей в охладитель.

Наиболее показательным признаком засорения воздухоохладителя является увеличение разности температур выходящей и входящей воды [14]. Это объясняется тем, что при засорении охладителя иногда засоряется также и измерительная шайба водомера, который вследствие этого может не изменить своих показаний, несмотря на уменьшенный расход воды; увеличение разности температур охлажденного воздуха и холодной воды может наблюдаться и при других неисправностях, например при наружной коррозии охладителя (см. п. 4-9-3).

Прочистить охладитель, сняв с него обе крышки. Известковые отложения удалить с трубок, промыв их слабым раствором соляной кислоты. Органические отложения снять специальными щетками (ершами).

Если воздухоохладитель состоит из нескольких секций, то перед чисткой измерить и сравнить перепады температуры воды на каждой их них, чтобы установить, какая из секций засорилась.

4-9-2. Воздухоохладитель отпотевает (что происходит главным образом зимой) вследствие того, что точка росы воздуха (температура, при которой воздух насыщен водяными парами), проходящего через охладитель, оказывается более высокой, чем температура трубок, шайб или проволочной спирали, навитой на

трубки охладителя. При отпотевании воздухоохладителя конденсирующаяся влага может быть занесена воздушным потоком внутрь машины. Влага представляет опасность главным образом для выводов обмоток высокого напряжения, между которыми может возникнуть короткое замыкание из-за «перекрытия» между выводами по влажной поверхности. Кроме этого, отпотевание ведет к коррозии шайб охладителя (см. п. 4-9-3).

А. *Температура воды, поступающей в охладитель, опустилась ниже точки росы охлаждаемого воздуха.*

Повысить температуру воды, поступающей в воздухоохладитель, путем перепуска нагретой воды, т. е. возвращая часть нагретой воды в охладитель. Повысить температуру воды в охладителях турбогенераторов можно, прибавив к ней отработанную (более теплую) воду от конденсатора турбины.

Б. *Значительное количество воздуха повышенной влажности подсасывается через неплотности из машинного помещения в охладительную систему машины.*

Уплотнить все стыки частей машины (см. рис. 4-9 и 4-10), а также все стыки в системе охлаждения. Если в системе охлаждения имеется добавочный висциновый фильтр, служащий для пополнения утечек воздуха и установленный в области разрежения (под машиной), то необходимо проследить за тем, чтобы этот фильтр засасывал воздух не из машинного помещения, а наружный воздух, так как только в этом случае температура воздуха, подсасываемого в систему охлаждения машины, будет ниже температуры воды, поступающей в охладитель (имеется в виду зимнее время, когда практически происходит отпотевание воздухоохладителя).

Установка такого добавочного фильтра при достаточном уплотнении системы охлаждения может полностью устранить отпотевание воздухоохладителя от рассматриваемой причины.

Уменьшение количества воды, поступающей в охладитель, не является надежным средством, предотвращающим отпотевание охладителя, так как это может привести лишь к ограничению объема охладителя и поверхности, подверженной отпотеванию; в первых рядах трубок, соприкасающихся с нагретым воздухом, отпотевание все же будет продолжаться.

Чтобы предотвратить скопление воды в случае отпотевания охладителя, надо устроить в полу камеры холодного воздуха дренаж с гидравлическим затвором для стока воды.

4-9-3. Воздухоохладитель поражен коррозией.

А. *Наружная коррозия возникает лишь в охладителях устаревшей конструкции со стальными лужеными шайбами, припаиваемыми к латунным трубкам.* На плохо пролуженных местах при отпотевании охладителя появляется коррозия (см. п. 4-9-2). Значительная коррозия увеличивает разность температур охлажденного воздуха и холодной воды и тем самым резко ухудшает работу охладителя. Современные охладители, состоящие из трубок с навитыми на них медными проволочными спиралями, припаиваемыми к трубкам, значительно меньше подвержены внешней коррозии.

Принять меры против отпотевания охладителей (см. п. 4-9-2).

Б. *Внутренняя коррозия появляется на внутренней поверхности трубок и на трубных досках главным образом вследствие электрохимических явлений.*

Можно рекомендовать установку так называемых протекторов, воспринимающих на себя разрушающее действие коррозии и этим предотвращающих разрушение основных деталей. Протекторы устанавливаются под крышками охладителя в водяных камерах с каждой стороны и должны иметь контакт с трубными досками. По мере разъедания коррозией протекторы заменяются новыми. По вопросу установки протекторов необходимо запросить рекомендации завода-изготовителя.

4-9-4. В воздухоохладителе появилась течь.

А. *В местах развальцовки трубок в трубных досках просачивается вода из-за недостаточной плотности развальцовки, повышенного давления в напорной магистрали водопровода, резких колебаний температуры охлаждающей воды.*

Произвести дополнительную развальцовку трубок. Установить нормальное давление в напорной магистрали водопровода в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя (обычно не более 0,2 МПа), не допускать резких колебаний температуры охлаждающей воды.

Б. *Трубка воздухоохладителя разрушилась вследствие механических повреждений, гидравлических ударов, коррозии* (см. п. 4-9-3), *а также явлений усталости металла трубок из-за их вибрации.* Усталостная прочность металла в коррозионной среде намного ниже, чем в нормальной среде. Поэтому наличие вредных примесей в охлаждающей воде, например хлора, может и при небольших механических напряжениях привести к образованию трещин и поломкам трубок.

В случае вибрации трубок осуществить дополнительное крепление их. При разрушении трубок произвести

химический анализ охлаждающей воды и при обнаружении вредных примесей питать охладители химически очищенной водой.

Поврежденную трубку можно выключить из системы охлаждения, забив пробки в ее концы с обеих сторон.

4-9-5. Работа воздухоохладителя ухудшилась в процессе эксплуатации — увеличилась при прочих неизменных условиях работы разность температур охлажденного воздуха и холодной воды.

А. См. п. 4-9-1.

Б. *Шайбы воздухоохладителя подверглись коррозии.*

См. п. 4-9-3.

В. *Значительно уменьшилось число действующих трубок, так как остальные заглушены, чтобы ликвидировать протекание.*

Необходим капитальный ремонт охладителя.

4-9-6. Вновь смонтированный воздухоохладитель работает неудовлетворительно.

А. *Воздухоохладитель не соответствует условиям работы.* Номинальными данными, характеризующими работу охладителя, являются потери, отводимые охладителем, расход воздуха, расход воды, температура входящей воды, температура охлажденного воздуха, перепад воздушного напора. Особенно сильно отражается на работе охладителя расход воздуха: понижение его против номинального значения не только резко ухудшает работу охладителя, но и снижает эффективность всей системы охлаждения машины.

Обратиться за консультацией на завод-изготовитель.

Б. *Воздухоохладитель по своим параметрам соответствует условиям работы, но имеет место неравномерное распределение*

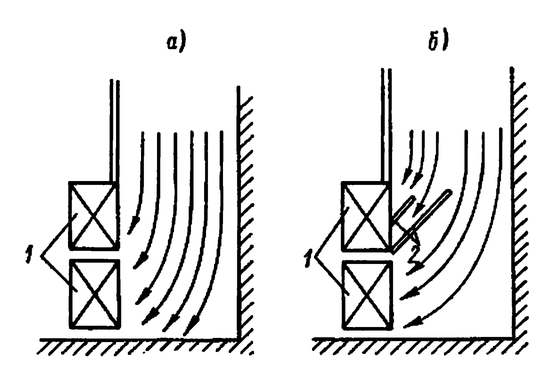


Рис. 4-15. Распределение потока воздуха между секциями воздухоохладителя: *а* — неравномерное; *б* — равномерное

1 — секция воздухоохладителя; *2* — направляющие перегородки

потока воздуха между секциями (рис. 4-15) *или между частями одной секции.* При этом может оказаться, что одна из секций (верхняя на рис. 4-15, *а*) или часть одной секции используется весьма слабо. Такое неравномерное распределение потока воздуха может возникнуть вследствие неправильной конструкции или неудачного распределения воздушных каналов.

Распределение натекающего потока воздуха по активной поверхности воздухоохладителя определяется измерением скорости воздуха, производимым при помощи анемометра или пневмометрической трубки в различных точках сечения воздушного канала перед воздухоохладителем.

Рекомендуется установка одной-двух направляющих перегородок из листовой стали (рис. 4-15, *б*).

Общим мероприятием, улучшающим работу системы вентиляции, является установка тепловой изоляции между воздухопроводами нагретого и охлажденного воздуха. Эта изоляция может быть выполнена асбестовыми листами толщиной 5 мм, защищенными снаружи листовой сталью толщиной 1 мм. Защитные листы вместе с асбестовыми приклепываются к воздухопроводу.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

5-1. ПЕРЕГРЕВ ТРАНСФОРМАТОРА

5-1-1. Трансформатор перегружен.

Проверить режим нагрузки. У трансформатора с постоянной нагрузкой можно установить перегрузку по амперметру; у трансформаторов с неравномерным графиком нагрузки — путем снятия суточного графика тока.

Следует учесть, что трансформаторы допускают нормальные перегрузки, зависящие от графика нагрузки, температуры окружающей среды и недогрузки в летнее время. Кроме того, в исключительных случаях (отсутствие резерва) допускаются аварийные перегрузки трансформатора вне зависимости от предшествующей нагрузки и температуры окружающей среды (ГОСТ 14209—85). Допустимая температура частей трансформатора и масла указана в ГОСТ 5616—81 Е.

Разгрузить трансформатор, включив параллельно еще один трансформатор или отключив менее ответственных потребителей.

5-1-2. Слишком высока температура в трансформаторном помещении.

Измерить температуру воздуха в трансформаторном помещении на расстоянии 1,5—2 м от бака трансформатора на середине его высоты. Если эта температура превышает более чем на 8—10° С температуру наружного воздуха, улучшить вентиляцию трансформаторного помещения. Для обеспечения нормальной вентиляции трансформаторных помещений, в которых установлены трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и выше, применяют специальные вытяжные трубы, устанавливаемые наверху помещения, а внизу его делают соответствующие отверстия для подвода холодного воздуха. Входные и выходные отверстия закрывают решетками или жалюзи. Обычно вентиляцию трансформаторных помещений рассчитывают так, чтобы разница между температурами входящего воздуха (внизу) и выходящего (вверху) не превышала 15° С.

5-1-3. Слишком низок уровень масла в трансформаторе. В этом случае обнаженная часть обмотки и активной стали сильно перегревается.

Убедившись в отсутствии течи масла из бака, долить масло до нормального уровня.

5-1-4. В трансформаторе имеются внутренние повреждения: замыкания между витками, фазами, образование короткозамкнутых контуров из-за повреждения изоляции болтов, стягивающих активную сталь трансформатора, замыкания между листами активной стали (см. п. 5-5-2, А — Г).

Все эти дефекты при незначительных короткозамкнутых контурах, несмотря на высокую местную температуру, не всегда дают заметное повышение общей температуры масла. Лишь бурное развитие этих повреждений ведет к быстрому росту температуры масла.

См. § 5-5.

5-2. НЕНОРМАЛЬНОЕ ГУДЕНИЕ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

5-2-1. Ослабла прессовка шихтованного магнитопровода.

Подтянуть прессующие болты.

5-2-2. Нарушена прессовка стыков в стыковом магнитопроводе.

С течением времени под влиянием вибрации магнитопровода ослабла затяжка вертикальных болтов, стягивающих стерж-

ни с ярмами. Это изменило зазоры в стыках, что и вызвало усиленное гудение.

Перепрессовать магнитопровод, заменив прокладки в его верхних и нижних стыках.

5-2-3. Вибрируют крайние листы магнитопровода.

Вставить клинья из электрокартона между листами.

5-2-4. Ослабли болты, крепящие крышку трансформатора и прочие детали.

Проверить затяжку всех болтов.

5-2-5. Трансформатор перегружен, или нагрузка фаз отличается значительной несимметричностью.

Устранить перегрузку или уменьшить несимметрию нагрузки.

5-2-6. Имеются замыкания между фазами, между витками.

Отремонтировать обмотку.

5-2-7. Трансформатор работает при повышенном напряжении.

Установить переключатель напряжения (при его наличии) в положение, соответствующее повышенному напряжению.

5-3. ПОТРЕСКИВАНИЕ ВНУТРИ ТРАНСФОРМАТОРА

5-3-1. Произошло перекрытие (но не пробой) между обмоткой или отводами и корпусом вследствие перенапряжений.

Осмотреть и отремонтировать обмотку.

5-3-2. Обрыв заземления. Как известно, активная сталь и все прочие детали магнитопровода в трансформаторе заземляются (т. е. соединяются с землей через крышки трансформатора и бак) для отвода в землю статических зарядов, появляющихся на этих частях (обмотка и металлические части магнитопровода, по существу, являются обкладками конденсатора). При обрыве заземления могут происходить разряды обмотки или ее отводов на корпус, что воспринимается как треск внутри трансформатора.

Восстановить заземление в полном соответствии с выполнением его заводом-изготовителем; присоединить заземление в тех же точках и с той же стороны трансформатора (обычно со стороны выводов обмотки низшего напряжения). При неправильном восстановлении заземления в трансформаторе могут возникнуть короткозамкнутые контуры, в которых могут появиться токи.

5-4. ПРОБОЙ ОБМОТОК И ОБРЫВ В НИХ

5-4-1. Пробой обмоток на корпус, между обмотками высшего и низшего напряжения или между фазами.

А. *Возникли перенапряжения, связанные с грозовыми явлениями, аварийными или коммутационными процессами.*

Б. *Резко ухудшилось качество масла (увлажнение, загрязнение и пр.).*

В. *Понизился уровень масла.*

Г. *Изоляция подверглась естественному износу (старению).*

Д. *При внешних коротких замыканиях, а также при замыканиях внутри трансформатора возникли электродинамические усилия.*

Следует указать, что при перенапряжениях могут происходить не пробои изоляции, а только перекрытия между обмотками, фазами или между обмоткой и корпусом. В результате перекрытия обычно происходит лишь оплавление поверхности нескольких витков и появляется копоть на соседних витках, полное же соединение между витками, фазами или же между обмоткой и корпусом отсутствует.

Пробой изоляции обмотки можно обнаружить мегомметром. Однако в некоторых случаях, когда в результате перенапряжений получаются оголенные места на обмотке в виде точек (точечный разряд), выявить дефект можно только, испытав трансформатор напряжением (приложенным или индуктированным).

Отремонтировать обмотку, а в случае надобности заменить масло.

5-4-2. Обрывы в обмотках (см. также § 5-6).

В результате обрыва или плохого контакта происходит оплавление или выгорание части проводника. Дефект обнаруживается по выделению горючего газа в газовом реле и работе последнего на сигнал или отключение (см. § 5-5).

А. *Плохо выполнена пайка обмотки.*

Б. *Имеются повреждения в проводах (отводах), соединяющих концы обмоток с выводами.*

В. *При коротких замыканиях как внутри, так и вне трансформатора развиваются электродинамические усилия.*

На включенном трансформаторе обрыв можно обнаружить по показаниям амперметров.

На отключенном трансформаторе для обнаружения обрыва используют метод замера сопротивлений обмоток по фазам мостом постоянного тока или метод амперметра — вольтметра.

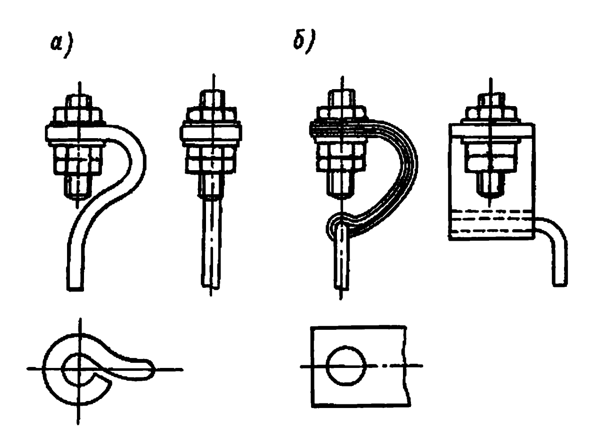


Рис. 5-1. Присоединение отводов: *а* — круглым проводом; *б* — медными лентами

Обрыв чаще всего происходит в местах изгиба кольца под болт (рис. 5-1, *а*).

Отремонтировать обмотку. Чтобы предотвратить повторение обрыва в отводах обмотки, следует отвод, выполненный круглым проводом, заменить гибким соединением — демпфером, состоящим из набора тонких медных лент сечением, равным сечению провода (рис. 5-1, *б*).

5-5. РАБОТА ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ

Газовая защита, как известно, является чувствительной защитой от внутренних повреждений или ненормального режима трансформатора. Эта защита в зависимости от интенсивности газообразования срабатывает либо на сигнал, либо на отключение, либо одновременно на то и другое.

5-5-1. Газовая защита сработала на сигнал.

А. *Небольшие внутренние повреждения трансформатора привели к слабому газообразованию.*

Б. *При заливке или очистке масла в трансформатор попал воздух.*

В. *Медленно понижается уровень масла из-за снижения температуры или вследствие течи масла из бака.*

5-5-2. Газовая защита сработала на сигнал и на отключение или только на отключение. Это вызывается внутренними повреждениями и другими причинами, сопровождаемыми сильным газообразованием.

А. *Произошло замыкание между витками первичной или вторичной обмотки трансформатора.*

Это повреждение может быть вызвано недостаточной изоляцией переходных соединений, продавливанием изоляции витков при прессовке или вследствие наличия заусенцев на меди витка, механическими повреждениями изоляции, естественным ее износом, перенапряжениями, электродинамическими усилиями при коротких замыканиях, обнажением обмотки вследствие снижения уровня масла.

По замкнутым накоротко виткам проходит ток большой силы, причем ток в фазе может лишь незначительно возрасти; изоляция витков быстро сгорает, могут выгореть сами витки, причем возможно разрушение и соседних витков. При развитии аварии может произойти междуфазное короткое замыкание.

Если число замкнутых витков значительно, то в короткий промежуток времени масло сильно нагревается и может вскипеть.

При отсутствии газового реле может произойти выброс масла и дыма через предохранительную пробку расширителя.

Замыкание между витками характеризуется не только ненормальным нагревом масла и некоторым увеличением тока на стороне питания, но и уменьшением омического сопротивления фазы, имеющей замыкание.

Б. *Произошло междуфазное короткое замыкание,* вызванное теми же причинами, что и пробой изоляции (см. п. 5-4-1), и протекающее весьма бурно. При этом может произойти выброс масла из расширителя или через диафрагму предохранительной трубки (в трансформаторах мощностью 1000 кВ·А и выше).

В. *Образовался короткозамкнутый контур из-за повреждения изоляции болтов, стягивающих активную сталь трансформатора.*

Короткозамкнутый контур сильно нагревается и вызывает перегрев масла. Болт и близлежащие листы активной стали могут быть разрушены.

В трансформаторах со стыковыми магнитопроводами короткозамкнутый контур может образоваться при соприкосновении накладок, прессующих стержни, с ярмами [27].

Г. *Произошло замыкание между листами активной стали вследствие повреждения междулистовой изоляции, естественного износа (старения) изоляции.*

Из-за такого повреждения изоляции появляются значительные вихревые токи, которые вызывают большие местные перегревы активной стали, что с течением времени может привести к местному выгоранию стали («пожару в железе»).

В стыковых магнитопроводах может произойти сильное на-

гревание стыков вихревыми токами из-за повреждения прокладок в них.

Д. *Значительно снизился уровень масла в трансформаторе или интенсивно выделяется воздух из масла вследствие резкого похолодания или же после ремонта (заливка свежего масла, его очистка центрифугой и пр.).*

Следует отметить, что в практике отмечены также случаи ложного срабатывания газовой защиты из-за неисправности цепей вторичной коммутации защиты.

Так как срабатывание газовой защиты может быть вызвано весьма различными причинами, то прежде чем приступить к устранению неисправности, необходимо точно установить причину, вызвавшую срабатывание газовой защиты. Для этого необходимо выяснить, какая из защит (релейных) сработала, произвести исследование газов, скопившихся в газовом реле, и определить их горючесть, цвет, количество и химический состав.

Чтобы определить горючесть газа, к верхнему крану газового реле подносят сбоку зажженную спичку, после чего открывают кран. Горючесть газа свидетельствует о наличии внутреннего повреждения. Если газы бесцветны и не горят, то причиной действия реле является выделившийся из масла воздух.

Цвет выделившегося газа позволяет судить о характере повреждения: бело-серый цвет свидетельствует о повреждении бумаги или картона, желтый — дерева, черный — масла. Так как окраска газа может через некоторое время исчезнуть, то его цвет следует определить тут же при его появлении. Снижение температуры вспышки масла также свидетельствует о наличии внутреннего повреждения.

Если причиной действия газовой защиты является выделение воздуха из масла, то воздух из реле следует выпустить.

При снижении уровня масла его следует долить, отключив защиту от действия на отключение. Когда доливка масла закончена и воздух перестал выделяться, защиту включают на отключение.

При повреждениях обмотки необходимо найти место повреждения и произвести соответствующий ремонт. Для этого необходимо вскрыть трансформатор и извлечь магнитопровод.

Замкнутые накоротко витки обмотки можно найти при включении трансформатора со стороны высшего напряжения на пониженное напряжение. Короткозамкнутый

контур будет сильно разогрет, и из обмотки появится дым. Этим способом могут быть найдены и другие короткозамкнутые контуры (см. п. 5-5-2, В).

Нахождение пробоя обмотки см. в п. 5-4-1. Нахождение обрыва в обмотке см. в п. 5-4-2.

Поврежденные места в активной стали могут быть найдены при холостом ходе трансформатора (при вынутом магнитопроводе) — эти места будут сильно нагреты. При этом испытании напряжение подводят к обмотке низшего напряжения и поднимают с нуля; обмотка высшего напряжения должна быть предварительно разъединена в нескольких местах во избежание пробоя обмотки (из-за отсутствия масла).

Замыкание между листами активной стали и ее оплавление можно устранить перешихтовкой поврежденной части магнитопровода с заменой междулистовой изоляции. Поврежденную изоляцию в стыках магнитопровода заменяют новой, состоящей из листов асбеста толщиной 0,8—1,0 мм, пропитанных глифталиевым лаком; сверху и снизу прокладывают кабельную бумагу толщиной 0,07—0,1 мм [27].

5-6. НЕНОРМАЛЬНОЕ ВТОРИЧНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

5-6-1. Первичные напряжения одинаковы; вторичные напряжения одинаковы при холостом ходе, но сильно разнятся при нагрузке.

А. *Плохой контакт в соединении одного из зажимов или внутри обмотки одной из фаз.*

Б. *Обрыв в первичной обмотке трансформатора стержневого типа, соединенного по схеме треугольник — звезда или треугольник — треугольник.*

5-6-2. Первичные напряжения одинаковы; вторичные напряжения неодинаковы при холостом ходе и при нагрузке.

А. *Вывернута обмотка (перепутаны начало и конец обмотки) одной из фаз вторичной обмотки при соединении звездой.*

Б. *Обрыв в первичной обмотке трансформатора, соединенного по схеме звезда — звезда. В этом случае три линейных вторичных напряжения не равны нулю.*

В. *Обрыв во вторичной обмотке трансформатора при соединении его по схеме звезда — звезда или треугольник — звезда.* В этом случае только одно линейное напряжение не равно нулю, а два других линейных напряжения равны нулю. При схеме соединения треугольник — треугольник обрыв во вторичной цепи

можно установить лишь путем измерения сопротивлений (см. рис. П8-17 приложения 8) или же по нагреву обмоток: обмотка фазы, имеющей обрыв, будет холодной из-за отсутствия в ней тока. В последнем случае возможна временная эксплуатация трансформатора при токовой нагрузке вторичной обмотки, составляющей 58 % номинальной.

Для устранения неисправностей, вызывающих нарушения симметрии вторичного напряжения трансформатора, необходим ремонт обмоток. Нахождение обрывов в обмотке см. в п. 5-4-2, В.

5-7. НЕРАВНОМЕРНАЯ НАГРУЗКА ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

5-7-1. Параллельно включенные трансформаторы (соединенные параллельно на сторонах низшего и высшего напряжения) имеют неодинаковый коэффициент трансформации. В этом случае между ними протекает уравнительный ток; при нагрузке трансформатор с более высоким вторичным напряжением (при холостом ходе) примет на себя бо́льшую (в процентном отношении) нагрузку.

5-7-2. Параллельно включенные трансформаторы имеют различные напряжения короткого замыкания. В этом случае нагрузка между ними распределяется пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания. Параллельное включение трансформаторов с нетождественными группами соединения обмоток равносильно короткому замыканию.

Соблюдение следующих условий параллельной работы трансформаторов обеспечивает практически равномерное распределение нагрузки: а) равенство (в пределах допусков) коэффициентов трансформации (±1 % для трансформаторов с коэффициентом трансформации, меньшим 3, и ±0,5 % для прочих); б) равенство (в пределах допусков) напряжений короткого замыкания (±10 % для всех трансформаторов); в) тождественность групп соединения обмоток; рекомендуется также, чтобы у параллельно соединенных трансформаторов отношение наибольшей мощности к наименьшей не превышало 3:1.

Включение трансформатора на параллельную работу после его монтажа, капитального ремонта со сменой обмоток или после прокладки нового кабеля допустимо лишь после фазировки (см. приложение 3).

5-8. НЕИСПРАВНОСТИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

В данном параграфе рассматриваются переключатели, предназначенные для регулировки коэффициента трансформации при отключенном трансформаторе.

Оплавлены или полностью выгорели контактные поверхности (стержни и кольца).

А. *Неудовлетворительная конструкция переключателя не обеспечивает необходимого нажатия контактов (это относится главным образом к переключателям устаревших типов).*

Б. *Переключатель плохо собран.*

В. *Токи короткого замыкания оказывают термическое действие.*

Значительное оплавлеиие или выгораиие контактных частей переключателя может привести к порче масла и срабатыванию газовой защиты (см. § 5-5).

При незначительном повреждении контактных поверхностей можно ограничиться зачисткой оплавленных мест пилой и тщательной пришлифовкой наждачным полотном. При значительных оплавлениях рекомендуется заменить переключатель новым. В зависимости от конструкции переключателя и дефектов его сборки возможен ряд других неисправностей, могущих вызвать аварию траисформатора.

Чтобы своевременно выявлять неисправности переключателей, рекомендуется периодически измерять омическое сопротивление обмоток на всех ответвлеииях.

5-9. ТЕЧЬ МАСЛА

5-9-1. Нарушена плотность сварных швов бака трансформатора, волнистых стенок бака с дном, в местах заделки труб в стенку бака, радиаторов в местах сварки и пр.

Места течи подварить ацетиленовой сваркой. До подварки бака масло из него слить, магнитопровод трансформатора вынуть, радиаторы сиять с бака.

По окончании сварки бак испытать водой в течеиие 1—2 ч под давлением столба воды высотой 1,5 м над уровнем масла в расширителе. Для этого бак заполняют водой, а в крышку герметически закрытого бака ввинчивают трубу длиной 1,5 м, диаметром от $^3/_4$ до 1 дюйма, снабженную наверху воронкой, через которую производят окончательное заполнеиие бака и трубы водой. Испытывать бак можно и маслом.

Незначительную течь масла можно устранить чеканкой.

5-9-2. Между крышкой и баком трансформатора имеются неплотности.

Подтянуть болты, крепящие крышку. Если это не поможет, установить новое уплотнение.

5-9-3. Имеются неплотности в установке вводов.

Течь масла между опорными фланцами и крышкой трансформатора устранить подтяжкой болтов или заменой прокладки новой. Просачивание масла в армировке опорного фланца в том случае, если фарфор имеет бортик, устранить армированием ввода в новый фланец и установкой резиновой прокладки между верхом фланца и опорной поверхностью фарфора. Если фарфор старого типа (без бортика, резиновой или пробковой прокладки), то необходимо заменить ввод [27]. Если масло просачивается через армировку верхнего колпачка, заменить ввод. Просачивание масла вверх по шпильке устранить подмоткой под нижнюю гайку асбестового шнура, пропитанного лаком.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. НОРМАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

А. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Выводы обмоток электрических машин постоянного тока согласно ГОСТ 183—74 имеют обозначения, приведенные в табл. П1-1.

Начало и конец каждой обмотки обозначаются одной и той же прописной буквой с проставленными после нее цифрами: для начала обмотки — 1, а для конца — 2. Начало и конец каждой обмотки определяются тем условием, что при правом вращении машины в режиме двигателя ток во всех обмотках, за исключением размагничивающих обмоток главных полюсов, протекает от начала 1 к концу 2. Направление вращения считается правым, когда машина вращается по часовой стрелке, если смотреть со стороны приводного конца вала; для машин, имеющих два приводных конца вала, направление вращения считается правым, когда машина вращается по часовой стрелке, если смотреть со стороны, противоположной коллектору. В соответст-

Таблица П1-1

Наименование обмоток	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Компенсационная обмотка	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Последовательная обмотка возбуждения	С1	С2
Параллельная обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Пусковая обмотка	П1	П2
Уравнительный провод и уравнительная обмотка	У1	У2
Обмотка особого назначения	О1; О3	О2; О4
Независимая обмотка возбуждения	Н1	Н2

вии с указанными условиями в машинах правого вращения начало обмотки якоря (Я1) находится на щетках той полярности, к которой присоединяют положительный провод сети независимо от того, работает ли машина в качестве двигателя или генератора. Иными словами, в режиме двигателя ток из сети направляется к Я1, а в режиме генератора ток от Я1 направляется в сеть.

Как известно, чтобы изменить направление вращения при сохранении режима двигателя или генератора, необходимо изменить на обратное направление тока либо в обмотках главных полюсов, либо в якоре, добавочных полюсах и в компенсационной обмотке.

В небольших машинах выводы обмоток обычно сосредоточены на доске зажимов (рис. П1-1 и П1-2), причем один из зажимов якоря (щеточная траверса) и один из зажимов добавочных полюсов соединены наглухо внутри машины, а на доску зажимов выведены другие зажимы якоря и добавочных полюсов. В некоторых случаях (например, для борьбы с помехами радиоприему) обмотку добавочных полюсов разбивают на две части, включаемые по обе стороны якоря, как это показано на рис. П1-3, а в коробку зажимов выводят начало одной половины обмотки добавочных полюсов Д1 и конец второй части этой обмотки Д2.

В крупных машинах на большую силу тока доска зажимов отсутствует и выводные концы прикрепляют к нижней части станины машины, причем выводные концы последовательной цепи выполняют в виде шин, а параллельной — в виде кабелей с наконечниками; выводят зажим якоря Я1, зажим компенсационной обмотки К2, зажимы параллельной обмотки возбуждения Ш1 и Ш2, уравнительной обмотки У1 и У2 и других специальных обмоток.

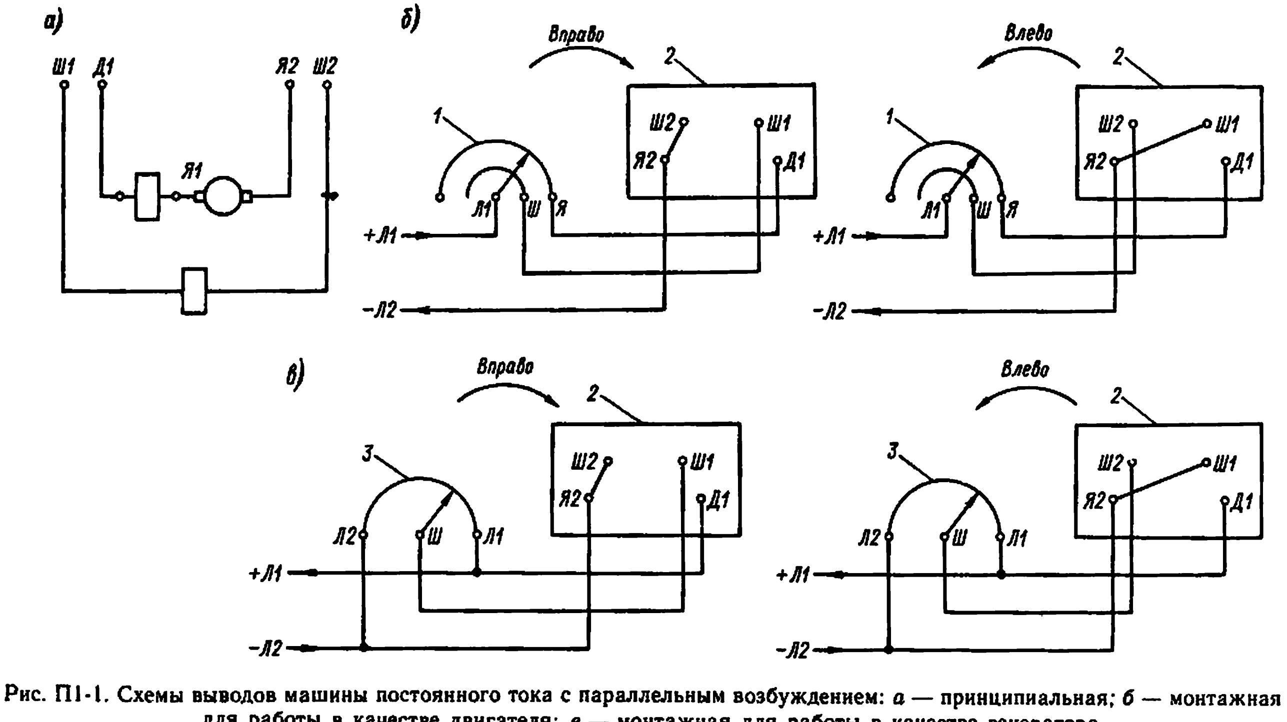


Рис. П1-1. Схемы выводов машины постоянного тока с параллельным возбуждением: *а* — принципиальная; *б* — монтажная для работы в качестве двигателя; *в* — монтажная для работы в качестве генератора
1 — пусковой реостат; *2* — доска зажимов; *3* — регулятор возбуждения

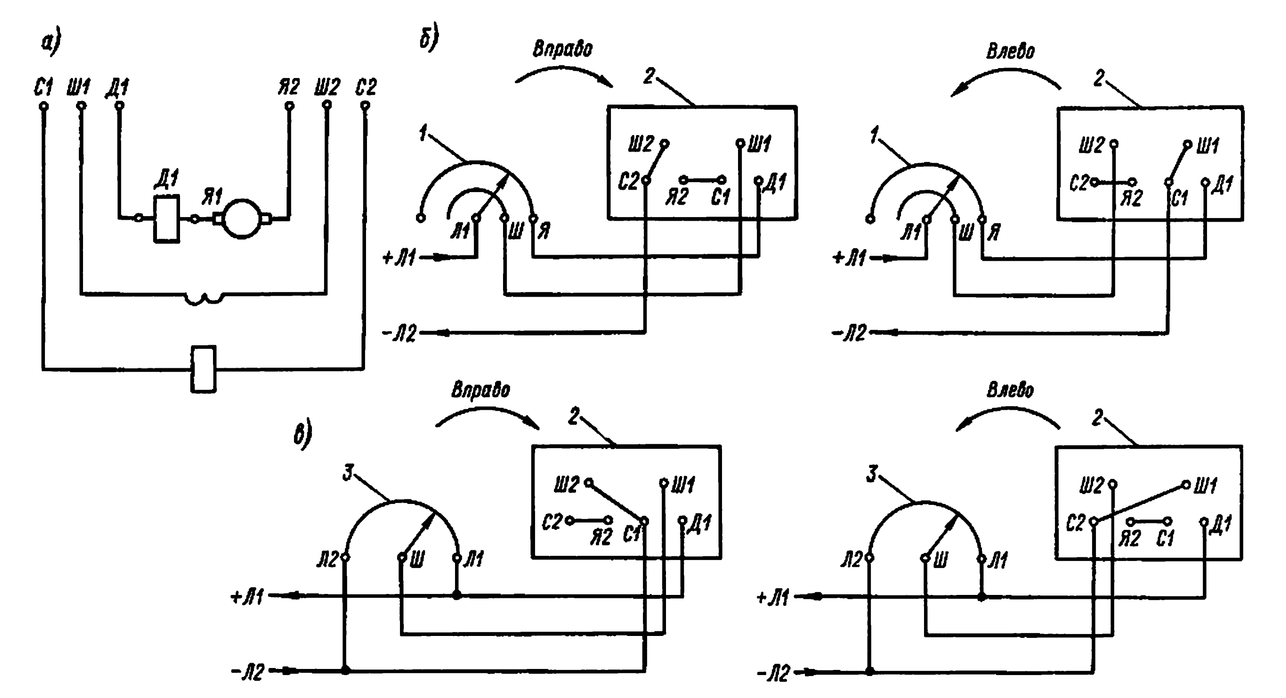


Рис. П1-2. Схемы выводов машины постоянного тока смешанного возбуждения: *а* — принципиальная; *б* — монтажная для работы в качестве двигателя; *в* — монтажная для работы в качестве генератора
Обозначения — см. рис. П1-1

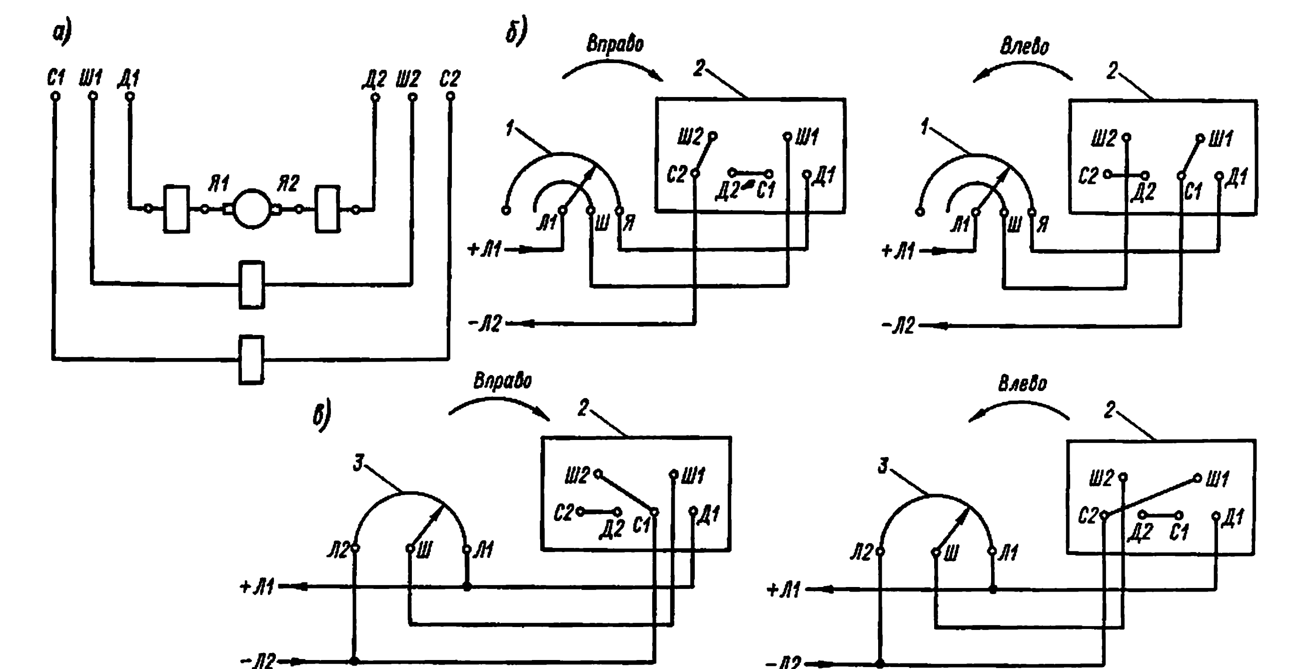
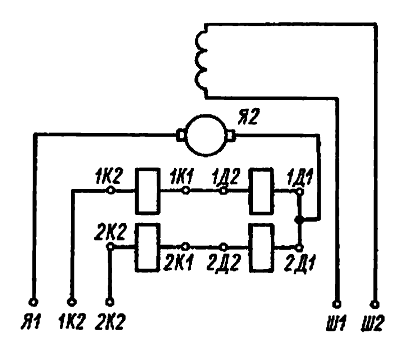


Рис. П1-3. Схемы выводов машины постоянного тока смешанного возбуждения при расположении частей обмотки добавочных полюсов по обе стороны якоря: *а* — принципиальная; *б* — монтажная для работы в качестве двигателя; *в* — монтажная для работы в качестве генератора

Обозначения — см. рис. П1-1

Рис. П1-4. Схема выводов машины постоянного тока с параллельными ветвями последовательных обмоток



В машинах на большую силу тока обмотки добавочных полюсов и компенсационная выполняются в виде двух параллельных ветвей каждая, причем каждую ветвь обмотки добавочных полюсов соединяют последовательно с соседней ветвью компенсационной обмотки. На рис. П1-4 показана такая схема соединений обмоток крупного прокатного двигателя. Отдельные ветви обмоток добавочных полюсов и компенсационной обозначены дополнительными цифрами 1 и 2 перед буквами Д и К; эти цифры относятся соответственно к первой и второй частям этих обмоток.

На рис. П1-1, П1-2 и П1-3 приведены схемы соединений выводов различных типов машин постоянного тока для случаев их работы в качестве двигателя и генератора (при согласном включении обмоток возбуждения) для различных направлений вращения.

Если левое вращение якоря машины достигается изменением направления тока в параллельной обмотке, то начало обмотки (Я1) также присоединяют к положительному проводу сети. Если же левое вращение якоря машины достигается изменением направления тока в цепи якоря, то при этом Я1 присоединяют к отрицательному проводу сети.

В вышеуказанных схемах все необходимые присоединения для различных направлений вращения выполнены исходя из следующих двух соображений: во-первых, для рассматриваемого случая согласного включения последовательной обмотки при любом направлении вращения необходимо, чтобы намагничивание от последовательной и параллельной обмоток совпадало по направлению; во-вторых, если оставить нетронутыми соединения выводов при переходе от режима генератора к режиму двигателя или наоборот, то при сохранении направления вращения ток в якоре и добавочных полюсах изменяет свое направление на обратное, а в последовательной и параллельной обмотках возбуждения сохраняет свое направление.

В рассматриваемых схемах изменение направления вращения двигателя или генератора осуществлено изменением направления тока в обмотках возбуждения.

При выборе варианта соединений выгодных концов для работы машины в качестве двигателя или генератора в некоторых случаях руководствуются требованиями наиболее удобного монтажа ошиновки. Иногда может оказаться необходимым изменять направление вращения генератора только изменением направления тока в якоре. Это может быть продиктовано нежелательностью или невозможностью (по местным условиям) изменять направление остаточного намагничивания, учитывая, что самовозбуждение генератора возможно лишь в том случае, если направление тока в обмотке возбуждения будет усиливать остаточное намагничивание.

Б. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Выводы обмоток машин трехфазного тока в соответствии с ГОСТ 183—74 имеют обозначения, указанные в табл. П1-2.

При этом для машины с одним направлением вращения порядок чередования обозначений выводов должен соответствовать порядку следования фаз для данного направления вращения.

Выводы машин переменного тока, имеющих составные (двойные, тройные) и секционированные обмотки, должны обозначаться теми же буквами, что и выводы простых обмоток (табл. П1-2), но с дополнительными цифрами впереди прописных букв.

Таблица П1-2

Наименование и схема соединений обмоток	Число выводов	Наименование выводов	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотки статора (якоря):				
открытая схема	6	Первая фаза	C1	C4
		Вторая фаза	C2	C5
		Третья фаза	C3	C6
соединение звездой	3 или 4	Первая фаза	C1	
		Вторая фаза	C2	
		Третья фаза	C3	
		Нейтраль	0	
соединение треугольником	3	Первый зажим	C1	
		Второй зажим	C2	
		Третий зажим	C3	
Обмотки возбуждения (индукторов) синхронных машин	2	—	И1	И2

Таблица П1-3

Для первой обмотки		Для второй обмотки	
1С1	1С4	2С1	2С4
1С2	1С5	2С2	2С5
1С3	1С6	2С3	2С6

Таблица П1-4

Для 4 полюсов	Для 6 полюсов	Для 8 полюсов	Для 12 полюсов
4С1	6С1	8С1	12С1
4С2	6С2	8С2	12С2
4С3	6С3	8С3	12С3

Таблица П1-5

Число выводов на контактных кольцах	Наименование выводов	Обозначение начала и конца выводов
3	Первая фаза	Р1
	Вторая фаза	Р2
	Третья фаза	Р3
4	Первая фаза	Р1
	Вторая фаза	Р2
	Третья фаза	Р3
	Нейтраль	0

Таблица П1-6

Число выводов	Наименование обмоток	Обозначение выводов	
		Начало	Конец
2	Обмотка статора (якоря) синхронных машин	С1	С2
	Обмотки статора асинхронных двигателей:		
2	главная	С1	С2
2	пусковая	П1	П2
2	Обмотка возбуждения (индукторов) синхронных машин	И1	И2

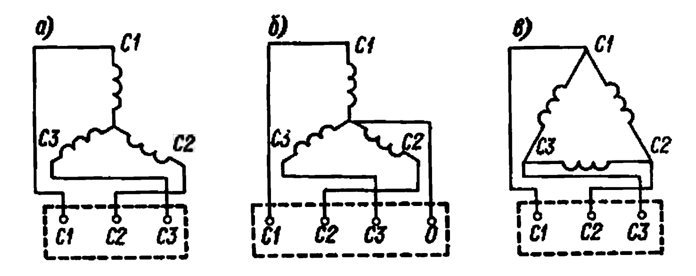


Рис. П1-5. Схемы расположения выводов трехфазных статорных обмоток: *а* — при соединении звездой; *б* — при соединении звездой с выведенной нейтралью; *в* — при соединении треугольником

Пример обозначения выводов для двух обмоток на статоре дан в табл. П1-3.

Выводы асинхронных двигателей, имеющих секционированные обмотки, позволяющие переключать число полюсов, должны обозначаться теми же буквами, что и выводы простых обмоток (см. табл. П1-2), но с дополнительными цифрами впереди прописных букв, указывающими на число полюсов данной секции.

Пример обозначения выводов для обмоток двигателя с четырьмя частотами вращения дан в табл. П1-4.

Обозначения выводов обмоток ротора трехфазных асинхронных двигателей должны производиться в соответствии с табл. П1-5.

Контактные кольца роторов асинхронных двигателей трехфазного и однофазного тока должны обозначаться буквами присоединенных к ним выводов обмотки ротора; прн этом кольца

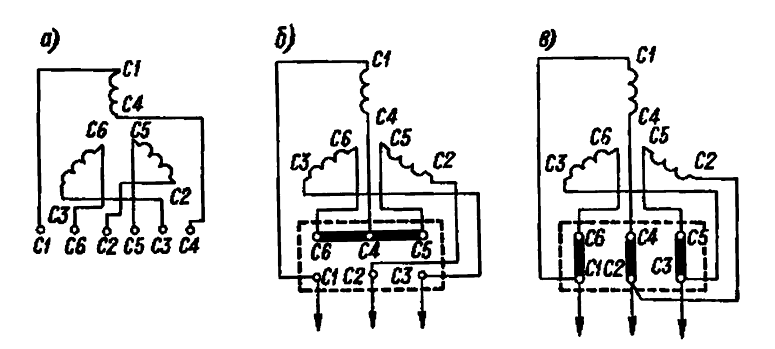


Рис. П1-6. Схемы расположения выводов трехфазных обмоток при наличии шести выводов: *а* — в ряд; *б* и *в* — для удобного соединения звездой или треугольником

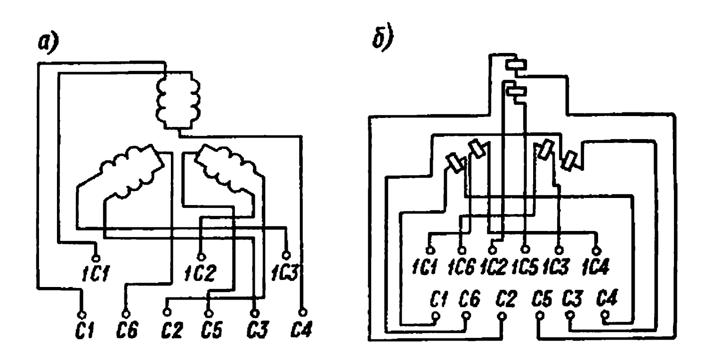


Рис. П1-7. Схемы расположения выводов статорных обмоток крупных турбогенераторов: *а* — при девяти выводах; *б* — при двенадцати выводах

должны быть расположены в порядке указанных букв, а кольцо Р1 должно быть наиболее удалено от обмотки ротора. Обозначение самих колец буквами необязательно.

Обозначение выводов обмоток однофазных машин должно производиться в соответствии с табл. П1-6.

На рис. П1-5, *а* и *в* даны схемы расположения выводов статорных обмоток трехфазных машин (синхронных и асинхронных) при наличии трех выводов и соединении фаз соответственно звездой и треугольником, а на рис. П1-5, *б* — при наличии четырех выводов (три фазных провода и нейтраль звезды).

На рис. П1-6 даны схемы расположения выводов трехфазной статорной обмотки при наличии шести выводов. С шестью выводами крупные машины изготовляются для возможности установки трансформаторов тока релейной защиты машины. Кроме того, шестью выводами часто снабжаются статорные обмотки машин трехфазного тока небольших мощностей, чтобы сделать возможной работу машины при двух напряжениях. Тогда расположение выводов в коробке зажимов соответствует указанному на рис. П1-6, *б* и *в*. Такое расположение выводов весьма удобно. Так, например, для соединения звездой соединяют вместе три верхних зажима С6, С4 и С5, а к сети присоединяют нижние зажимы С1, С2 и С3 (рис. П1-6, *б*); при соединении обмоток треугольником соединяют попарно по вертикали зажимы С6—С1, С4—С2 и С5—С3 (рис. П1-6, *в*), которые присоединяют к сети.

На рис. П1-7, *а* и *б* даны расположения выводов статорных обмоток крупных турбогенераторов, если смотреть на выводы со стороны возбудителя; в первом ряду находятся выводы С1, С6, С2, С5, С3 и С4, а во втором ряду (за первым рядом) — выводы

1С1, 1С2, 1С3 и т. д. Каждая фаза состоит из двух ветвей. На рис. П1-7, *а* показана схема расположения девяти, а на рис. П1-7, *б* — двенадцати выводов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТОК

А. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Проверка полярности полюсов. При проверке правильности соединения обмоток полюсов сначала определяют, обеспечивают ли соединения между катушками отдельных полюсов чередование полярности как главных, так и добавочных полюсов, а затем определяют правильность включения каждой обмотки в целом. Необходимо, чтобы чередование добавочных полюсов по отношению к чередованию главных полюсов соответствовало определенному направлению вращения машины в зависимости от того, работает ли машина в качестве двигателя или генератора. При работе машины в качестве генератора главные и добавочные полюсы должны чередоваться так, чтобы по направлению вращения машины за любым главным полюсом находился разноименный добавочный ($\rightarrow N - s - S - n$), а при работе машины в качестве двигателя — за главным находился одноименный добавочный ($\rightarrow N - n - S - s$).

Ниже приводятся различные способы определения чередования полярности полюсов.

Определение чередования полюсов внешним осмотром. При осмотре прослеживают за направлением протекания тока по обмотке и, пользуясь правилом буравчика, определяют полярность полюсов, задаваясь условным направлением тока. Этот способ удобен при доступности обмоток и наглядности выполнения катушек или когда известно, что все катушки имеют одинаковое направление намотки и одинаковое расположение одноименных выводов, т. е. начал и концов. Особенно удобен этот способ для катушек последовательных обмоток, когда благодаря большому сечению витков направление намотки наиболее наглядно.

Схемы намотки катушек главных и добавочных полюсов обычно одинаковы. На рис. П2-1, *а* показано последовательное

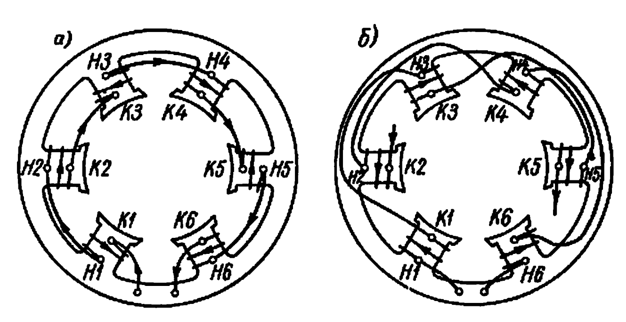


Рис. П2-1. Соединение катушек полюсов: *а* — последовательное; *б* — в две параллельные ветви

соединение всех катушек главных полюсов, а на рис. П2-1, *б* дано соединение полюсов в две ветви; начала и концы обмоток отдельных полюсов обозначены соответственно буквами Н и К (с цифрой, обозначающей порядковый номер полюса); в одной ветви находятся все четные полюсы, в другой — нечетные, т. е. в каждой ветви находятся полюсы одинаковой полярности; каждая ветвь состоит из полюсов, соединенных последовательно через один. Подобного рода соединение катушек полюсов имеет место в крупных машинах, когда применяют параллельное соединение последовательных обмоток главных и добавочных полюсов или последовательное соединение обмоток добавочных полюсов, обе ветви которых находятся по разные стороны якоря (см. рис. П1-3, *а*).

Определение чередования полюсов магнитной стрелкой. Для этого питают обмотку током, стрелку подвешивают на короткой тонкой нити и осторожно (во избежание перемагничивания стрелки) подносят поочередно к каждому полюсу. О полярности полюсов судят по тому, какой конец магнитной стрелки притягивается к полюсу.

В качестве магнитной стрелки могут быть использованы два стальных пера, плотно связанные проволокой и подвешенные на нити (рис. П2-2). Перья должны быть предварительно намагничены, и полярность их должна быть помечена. Необходимо

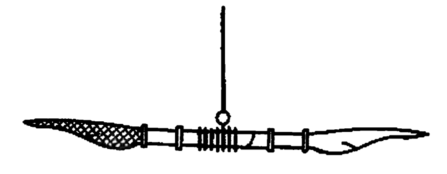


Рис. П2-2. Стальные перья в качестве магнитной стрелки

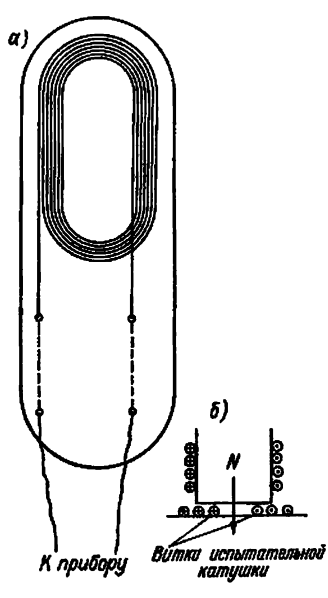


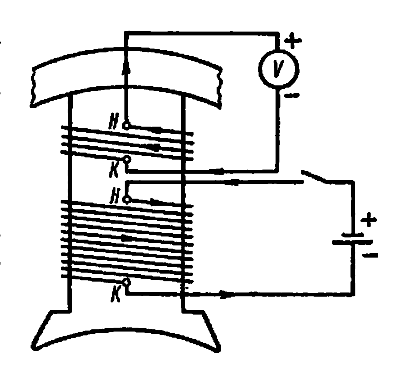
Рис. П2-3. Испытательная катушка: *а* — расположение витков; *б* — направление тока в испытательной катушке

учесть, что слишком сильное магнитное поле может перемагнитить стрелку, если искусственно препятствовать ее вращению. Поэтому применять магнитную стрелку в какой-либо оправе (компас), препятствующей свободному движению стрелки, не рекомендуется.

При разобранной машине магнитную стрелку подносят к внутренней поверхности полюсов, а при собранной машине — к полюсным наконечникам. Если же машина закрытого типа, то стрелку подносят к головкам болтов, крепящих полюсы к станине. В этом случае необходимо в обмотку подать больший ток, чем при вышеуказанных способах; кроме того, необходимо учесть, что стрелка в этом случае покажет полярность, противоположную действительной полярности полюса. Способ магнитной стрелки встречает затруднения при определении полярности полюсов, создаваемой последовательными обмотками крупных машин (последовательной обмоткой главных полюсов, обмоткой добавочных полюсов), так как для питания обмоток требуется значительный ток при низком напряжении. При недостаточном токе и при наличии остаточного намагничивания вследствие слабого намагничивания током стрелка может дать неправильные показания.

Определение чередования полюсов специальной катушкой. Испытательная катушка (рис. П2-3, *а*) представляет собой витки тонкой изолированной проволоки, приклеенные к куску тонкого картона или прикрепленные к нему каким-либо другим способом; концы катушки присоединяют к милливольтметру. При определении полярности полюсов в обмотку подают ток, а испытательную катушку вдвигают в зазор между якорем и полюсом и быстро ее выдергивают; в результате стрелка прибора отклоняется в определенную сторону в зависимости от направления тока в обмотке полюса. При правильном чередовании полюсов направление отклонения стрелки милливольтметра будет также чередоваться.

Рис. П2-4. Схема определения правильности включения последовательной обмотки по отношению к параллельной



При переносе катушки от полюса к полюсу ее не следует переворачивать, она должна быть обращена к полюсу одной и той же стороной. Вместо того чтобы выдергивать катушку, можно оставить ее на месте, а производить выключение тока; при этом также произойдет отклонение стрелки милливольтметра в сторону, зависящую от полярности полюса. В соответствии с правилом Ленца направление тока в испытательной катушке (рис. П2-3, *б*) будет таким же, каким оно было в обмотке до ее выключения. Если катушку невозможно поместить в зазор между полюсами, ее можно, так же как и при способе магнитной стрелки, прикладывать к болтам, крепящим полюсы к станине. Для получения удовлетворительных результатов в этом случае необходимо либо подать в обмотку ток, больший, чем в первом случае, либо применить испытательную катушку с бо́льшим числом витков.

Указаными способами можно также проверить, правильна ли полярность последовательной обмотки по отношению к параллельной. Для этого каждую из этих обмоток питают током известного направления и, произведя соответствующие испытания, сопоставляют их результаты для каждого полюса.

Правильное включение последовательной обмотки по отношению к параллельной, расположенной на одном общем полюсе с первой, можно определить, если известны одноименные зажимы этих обмоток. Для этого в одну из обмоток подают питание (рис. П2-4), в момент включения рубильника во второй обмотке индуктируется ЭДС, направление которой может быть определено вольтметром. Если обе обмотки имеют одинаковое направление намотки, то в момент включения рубильника направление отклонения стрелки вольтметра будет положительным (вправо от нуля), если положительный зажим от источника питания (аккумулятора) и положительный зажим вольтметра присоединены к одноименным зажимам.

Необходимо иметь в виду, что во всех случаях питания током обмоток генератора с самовозбуждением необходимо во избежание перемагничивания машины присоединять полюс сети

к соответствующим зажимам параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

2. Проверка правильности соединений выводов. Необходимо определить начала и концы обмоток главных и добавочных полюсов при известной их полярности. Имея эти данные и зная полярность якоря (щеток), нетрудно установить правильное соединение обмоток для требуемого направления вращения машины.

Если предоставляется возможность произвести пробный пуск машины в качестве генератора или электродвигателя, то правильное включение выводов машины может быть определено, если и полярность якоря неизвестна, а известно лишь чередование главных и добавочных полюсов, в зависимости от направления тока в их обмотках.

При пробном пуске машины в качестве генератора вовсе не обязательно доводить ее до номинальной частоты вращения, достаточно лишь повернуть якорь (рычагом, краном) при возбужденной машине. Зная полярность зажимов обмотки возбуждения и определив полярность щеток при помощи магнитоэлектрического прибора, при известном направлении поворота якоря можно определить правильное соединение выводов всех обмоток. При пробном пуске машины в качестве электродвигателя ее пускают в ход толчком при полностью введенном пусковом сопротивлении и определяют направление вращения. Зная полярность щеток и выводов обмотки возбуждения, можно также определить необходимое соединение выводов всех обмоток для получения требуемого направления вращения.

Если такой пробный пуск машины осуществить невозможно, то полярность выводов якоря можно определить одним из нижеуказанных способов.

Определение полярности якоря по типу обмотки. Если известен тип обмотки якоря, полярность полюсов и направление его вращения, то полярность якоря находят по рис. П2-5, где направление вращения указано, если смотреть на якорь со стороны приводного конца вала, а при двух концах вала — со стороны, противоположной коллектору. При обычно принятой форме лобовых частей обмоток щетки на коллекторе устанавливают против середины главных полюсов.

В случае если данные о типе обмотки отсутствуют и установить его осмотром не удается, то и тогда полярность якоря можно определить по рис. П2-5, если только представляется возможным питать обмотку якоря постоянным током.

Определение полярности якоря способом питания его постоянным током. Если питать током через щетки неподвижный якорь, не включая в цепь добавочные полюсы, то посредине между главными полюсами образуется поле якоря, причем на-

Тип обмотки	Группа	Полярность щетки, расположенной против северного полюса			
		Генератор		Двигатель	
		Правое вращение якоря	Левое вращение якоря	Правое вращение якоря	Левое вращение якоря
Петлевая неперекрещенная с нормальными петушками Петлевая перекрещенная с уравнительными соединениями в петушках Волновая неперекрещенная	I	+	−	+	−
Петлевая перекрещенная с нормальными петушками Петлевая неперекрещенная с уравнительными соединениями в петушках Волновая перекрещенная	II	−	+	−	+

Рис. П2-5. Полярность зажимов якоря в зависимости от типа обмотки

правление этого поля будет зависеть от полярности якоря и типа обмотки.

Если питать током обмотку якоря группы I (см. рис. П2-5), то левее положительного полюса питания (если смотреть на якорь со стороны коллектора) расположится северный полюс N поля якоря, а правее — южный S (рис. П2-6). Если питать током обмотку якоря группы II, то слева от положительного полюса питания будет южный полюс поля якоря, а справа — северный.

Полярность поля якоря можно определить при помощи магнитной стрелки или испытательной катушки (см. рис. П2-3, *а*), помещаемой посредине между главными полюсами, производя выключение тока.

Определение правильности присоединения обмотки добавочных полюсов по отношению к якорю. В якорь подают постоянный ток не более 10 % номинального, обмотки возбуждения отсоединяют, обмотку добавочных полюсов в цепь не включают (рис. П2-7). В зазор между одним из добавочных полюсов и якорем вставляют испытательную катушку (см. рис. П2-3, *а*), присоединяемую к милливольтметру; затем рубильником размыкают

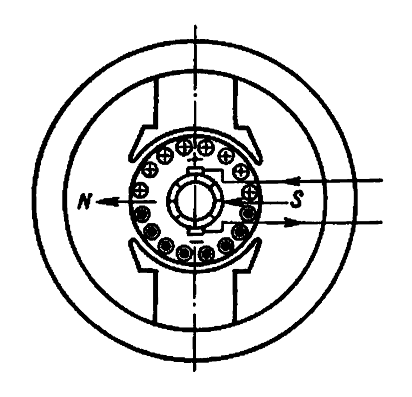


Рис. П2-6. Поле якоря при питании его обмотки током

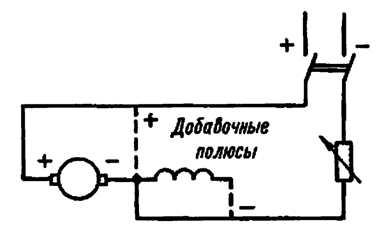


Рис. П2-7. Схема определения правильности включения обмотки добавочных полюсов способом питания якоря постоянным током

цепь тока и следят за направлением отклонения стрелки прибора. Далее, оставив испытательную катушку между якорем и добавочным полюсом на прежнем месте, присоединяют обмотку добавочных полюсов так, как это показано штрихами на рис. П2-7; при этом обмотка якоря оказывается не включенной в сеть.

Если при выключении тока отклонение стрелки прибора противоположно отклонению при выключении тока в первом случае, то обмотка добавочных полюсов включена правильно. Это объясняется тем, что при правильном включении обмотки добавочных полюсов магнитный поток последних должен быть направлен против потока якоря.

При наличии в машине компенсационной обмотки этот опыт можно выполнить, включив обмотку добавочных полюсов вместе с компенсационной; в случае правильного соединения компенсационной обмотки с обмоткой добавочных полюсов этот опыт определяет одновременно правильность включения якоря по отношению к обеим обмоткам.

В случае если на установке отсутствует постоянный ток, то проверить правильность включения обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки по отношению к якорю можно с помощью переменного тока [8], например, от осветительной сети. Для этого надо пропустить ток через реостат либо применить сварочный трансформатор или же трансформатор для безопасного освещения. При этом поступают так, как указано на

Рис. П2-8. Схема определения правильности включения обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки способом питания якоря переменным током

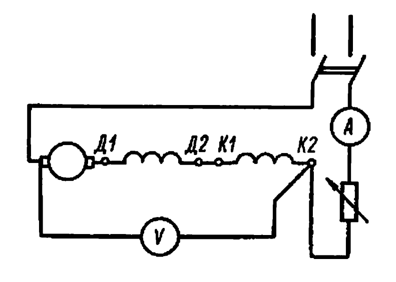


рис. П2-8: включают названные обмотки последовательно с якорем в цепь переменного тока и при помощи амперметра и вольтметра определяют полное сопротивление этой цепи переменному току. Измерение может быть произведено и при небольшом токе. Затем обмотку добавочных полюсов вместе с компенсационной включают последовательно с якорем так, чтобы ток в них протекал в противоположном направлении, и вторично определяют полное сопротивление этой цепи.

Правильным соединением обмоток считается такое, при котором полное сопротивление имеет меньшее значение. Это объясняется тем, что при правильном подключении к якорю обмоток добавочных полюсов вместе с компенсационной обмоткой магнитное поле якоря направлено против поля добавочных полюсов и компенсационной обмотки; сопротивление же переменному току последовательно соединенных обмоток, создающих встречные потоки, будет меньше сопротивления обмоток, создающих одинаково направленные потоки.

Б. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Проверка правильности соединений выводов трехфазных обмоток сводится к определению начал и концов каждой фазы. Начала и концы фаз можно определить при помощи милливольтметра. Для этого сначала мегомметром или при помощи контрольной лампы определяют выводы обмоток каждой фазы. Затем к обмотке одной из фаз присоединяют через рубильник (рис. П2-9) и реостат источник постоянного тока, который выбирают таким, чтобы по обмотке проходил небольшой ток (желателен аккумулятор напряжением 2 В).

При замыкании и размыкании рубильника в обмотках других фаз индуктируются ЭДС, направление которых определяется милливольтметром. Если к условному «началу» присоединен плюс батареи, а к условному «концу» — минус, то при размыкании рубильника на других фазах будет плюс на «началах» и минус на «концах», что показывает милливольтметр, подключаемый поочередно к выводным концам двух других фаз. При

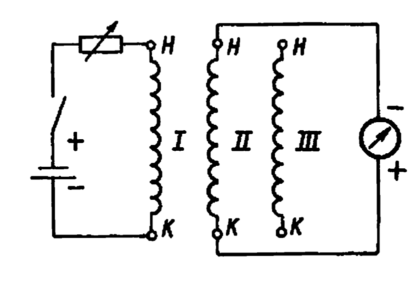


Рис. П2-9. Схема для проверки правильности соединений выводов трехфазных обмоток

замыкании тока рубильником полярность на других фазах будет обратной указанной.

В тех случаях, когда машина имеет три вывода (при соединении обмотки звездой или треугольником), правильность соединения фаз можно проверить, если питать два вывода переменным током пониженного напряжения и вольтметром измерять напряжения между третьим выводом и каждым из выводов, присоединенных к сети.

В случае правильного соединения эти напряжения будут равны половине напряжения, приложенного к двум выводам; причем это соотношение напряжений сохраняется при питании любых двух выводов.

Опыт следует произвести три раза, каждый раз подводя напряжение к различной паре выводов. Если же одна из фаз присоединена неправильно, то при двух опытах из трех напряжения между третьим выводом и каждым из двух других будут неодинаковы.

Этот опыт для короткозамкнутого асинхронного двигателя следует проводить при напряжении $^1/_5$—$^1/_6$ номинального во избежание перегрева обмоток; при фазном роторе его обмотка должна быть разомкнута.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ И ФАЗИРОВКА ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

А. ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ

Согласно ГОСТ 11677—85 начала обмоток двухобмоточного однофазного трансформатора обозначают буквами *А* и *а*, концы — *X* и *x*. В трехфазных двухобмоточных трансформаторах начала и концы обмоток обозначают соответственно буквами *А*, *В*, *С*; *а*, *b*, *с* и *X*, *Y*, *Z*; *x*, *y*, *z*. Прописные буквы относятся к обмоткам высшего напряжения, а строчные — к обмоткам низшего напряжения. Зажимы нейтрали при соединении в звезду обозначают *0* и *о*. Понятия начала и конца обмотки условны.

Расположение выводов на крышке двухобмоточных трансформаторов показано на рис. П3-1.

В трехфазных трансформаторах применяют следующие схемы соединений: Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z, Y/Δ, Δ/Y, Y/Z (Y — соединение звездой, Δ — треугольником, Z — зигзаг-звездой; в числителе указаны соединения обмотки высшего напряжения, в знаменателе — низшего напряжения) [1].

Эти схемы образуют 12 различных групп соединений со сдвигом фаз линейных ЭДС первичной и вторичной обмоток от 0 до 330° через 30°. Этот сдвиг фаз принято характеризовать положением стрелок часов, причем вектор ЭДС обмотки высшего напряжения совмещают с большой (минутной) стрелкой часов и всегда устанавливают на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки низшего напряжения соот-

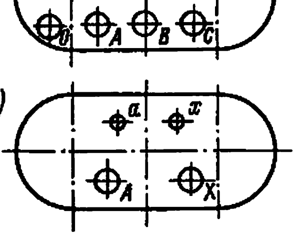


Рис. П3-1. Расположение выводов на крышке двухобмоточных трансформаторов: *а* — трехфазных мощностью 5—6300 кВ·А с высшим напряжением до 35 кВ; *б* — однофазных всех номинальных мощностей и напряжений

[1] В литературе (см. ГОСТ 3484—77) можно встретить обозначения: Д — соединение треугольником; У — соединение звездой.

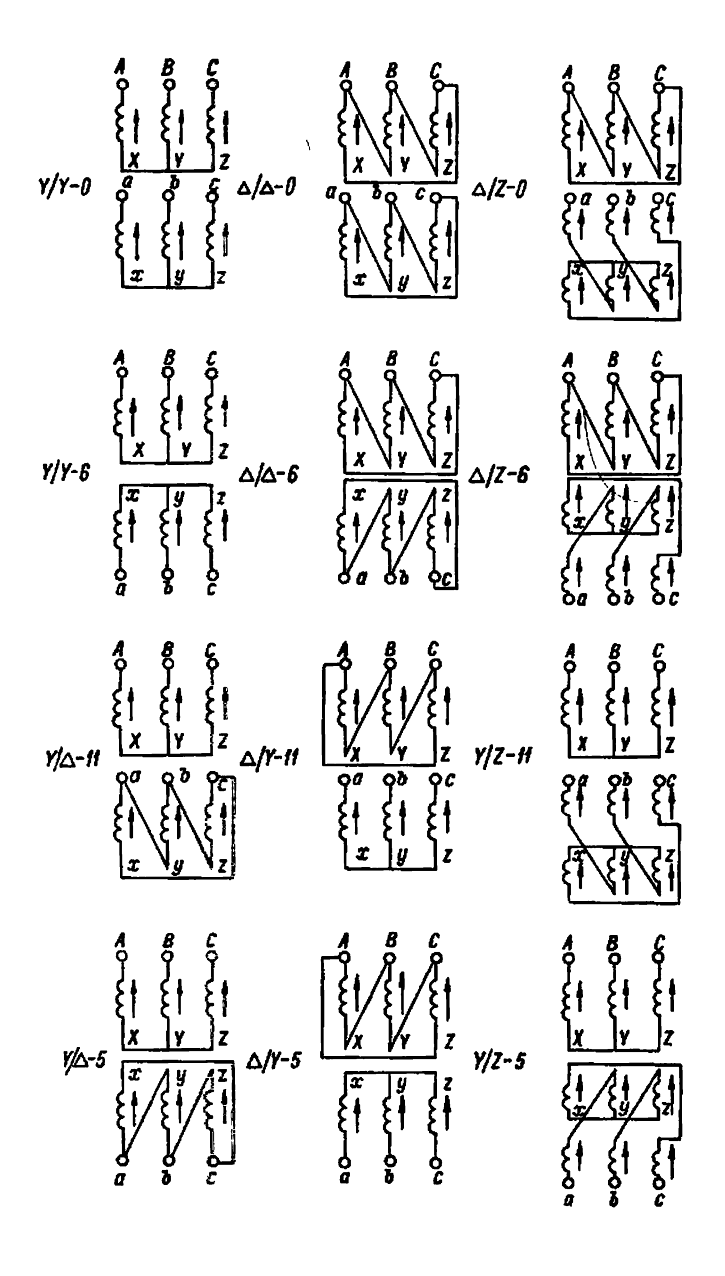


Рис. П3-2. Схемы основных групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов и обозначения зажимов

Четные группы

Группа	Угловое смещение ЭДС	Векторная диаграмма линейных ЭДС	Обозначение выводов
(0)	0°		A B C a b c
4	120°		A B C c a b
8	240°		A B C b c a
(6)	180°		A B C a b c
10	300°		A B C c a b
2	60°		A B C b c a

Нечетные группы

Группа	Угловое смещение ЭДС	Векторная диаграмма линейных ЭДС	Обозначение выводов
(11)	330°		A B C a b c
3	90°		A B C c a b
7	210°		A B C b c a
(5)	150°		A B C a b c
9	270°		A B C c a b
1	30°		A B C b c a

Рис. П3-3. Сводные данные групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов

ветствует малой (часовой) стрелке; положение последней зависит от сдвига фаз ЭДС обеих обмоток. Например, сдвиг фаз 0° соответствует 12 ч (обе стрелки совпадают), и такое соединение называют группой 0; сдвигу фаз 180° соответствует группа 6.

Схемы Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z могут образовывать четные группы 2, 4, 6, 8, 10, 0; схемы Y/Δ, Δ/Y, Y/Z — нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11. Группы 0 и 6 являются основными четными группами, а группы 11 и 5 — основными нечетными группами.

На рис. П3-2 даны схемы основных групп соединений трансформаторов; обмотки, находящиеся на одном стержне, изображены одна под другой; стрелками показаны направления ЭДС. Остальные группы являются производными; они образуются путем круговой перемаркировки зажимов без изменения самих

внутренних соединений (рис. П3-3). Из группы 0 образуются группы 4 и 8, из группы 6 — группы 10 и 2, из групп 11 и 5 — соответственно группы 3, 7 и 9, 1.

В СССР стандартизованы (ГОСТ 11677—85) группы Y/Yн-0, Y/Δ-11, Yн/Δ-11 с выводом в случае надобности нейтрали звезды.

Б. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЙ

В тех случаях, когда группа соединений неизвестна, она может быть определена при помощи вольтметра. Для этого два одноименных зажима высшего и низшего напряжений (например, *A* и *a*) соединяют перемычкой; к обмотке низшего напряжения подводят пониженное симметричное трехфазное напряжение (рис. П3-4) и производят измерение напряжений U_{bB}, U_{cC}, U_{cB} между зажимами *b*—*B* и *c*—*C* и *c*—*B*. Напряжения U_{bB} и U_{cC} должны быть одинаковы. Затем определяют, будет ли напряжение U_{cB} равно (р) напряжению U_{bB}, больше (б) или меньше (м) напряжения U_{bB} и по табл. П3-1 определяют группу соединений. Если результаты измерений не соответствуют ни одному из указанных в таблице, то это свидетельствует о том, что маркировка обмоток произведена в разной последовательности (например, *A*—*B*—*C* и *a*—*c*—*b*).

Таблица П3-1

Группа соединений	$U_{bB}=U_{cC}$	U_{cB}	Группа соединений	$U_{bB}=U_{cC}$	U_{cB}
0	$n-1$	—	6	$n+1$	—
1	$\sqrt{n^2-n\sqrt{3}+1}$	б	7	$\sqrt{n^2+n\sqrt{3}+1}$	м
2	$\sqrt{n^2-n+1}$	б	8	$\sqrt{n^2+n+1}$	м
3	$\sqrt{n^2+1}$	б	9	$\sqrt{n^2+1}$	м
4	$\sqrt{n^2+n+1}$	б	10	$\sqrt{n^2-n+1}$	м
5	$\sqrt{n^2+n\sqrt{3}+1}$	р	11	$\sqrt{n^2-n\sqrt{3}+1}$	р

Примечание. *n* — отношение высшего линейного напряжения к низшему.

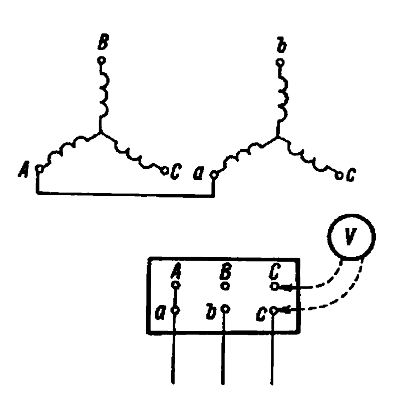


Рис. П3-4. Схема для определения группы соединения трансформатора

При больших коэффициентах трансформации возможны ошибки в определении группы соединений. В этом случае рекомендуется к обмотке высшего напряжения присоединить понижающий трансформатор с группой соединений 0 и при измерениях вместо зажимов *A*, *B* и *C* использовать вторичные зажимы *a*, *b* и *c* понижающего трансформатора.

Группы соединений можно определить и другими способами, например фазометром, ваттметром или полярометром.

В. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП

Для параллельного включения трансформаторов необходима тождественность групп соединений обмоток.

Возможно параллельное включение трансформаторов в четырех указанных ниже случаях:

1. При одинаковых группах соединений обмоток.

2. Между основными группами и их производными, т. е. между группами 0, 4, 8, 6, 10, 2; 11, 3, 7, 5, 9, 1, так как путем круговой перемаркировки зажимов одна группа может быть превращена в другую. Для параллельного включения трансформаторов необходимо соединить зажимы в порядке, указанном в табл. П3-2. В ее столбцах указаны зажимы, соединяемые при параллельном включении трансформаторов основной и производной групп.

3. Между группами 11, 3, 7 и соответственно группами 5, 9, 1. В табл. П3-3 дан порядок включения зажимов для случая подключения трансформатора группы 5 к группе 11.

Таблица П3-2

Группа соединений				Обмотки высшего напряжения			Обмотки низшего напряжения		
12	6	11	5	*A*	*B*	*C*	*a*	*b*	*c*
4	10	3	9	*A*	*B*	*C*	*c*	*a*	*b*
8	2	7	1	*A*	*B*	*C*	*b*	*c*	*a*

Таблица П3-3

Группа соединений	Обмотки высшего напряжения			Обмотки низшего напряжения		
11	*A*	*B*	*C*	*a*	*b*	*c*
5	*A* *C* *B*	*C* *B* *A*	*B* *A* *C*	*c* *b* *a*	*b* *a* *c*	*a* *c* *b*

4. Между нечетными группами со сдвигом векторов вторичных напряжений 60°, например между группами 1 и 11. Для этого необходимо у трансформатора группы 1 перекрестить две любые фазы на стороне высшего напряжения и те же фазы на стороне низшего напряжения.

Недопустимо параллельное включение трансформаторов четных групп с трансформаторами нечетных групп, так как переключениями невозможно одну группу превратить в другую.

Параллельное включение трансформаторов групп 0, 4, и 8 с трансформаторами групп соответственно 6, 10, 2 возможно лишь путем перемены местами начал и концов первичной или вторичной обмотки у одного из трансформаторов. Для этого необходимы выемка магнитопровода и перепайка обмотки.

Возможность параллельного включения трансформаторов нечетных групп 11, 3 и 7 с трансформаторами соответственно нечетных групп 5, 9 и 1 или группы 1 с группой 11 может быть пояснена следующим образом.

При перекрещивании каких-либо двух фаз первичной обмотки трансформатора, например фаз *B* и *C*, как для случая соединения Y/Δ (рис. П3-5, *а* и *б*), так и для случая соединения Δ/Y (рис. П3-5, *в* и *г*) векторные диаграммы первичных ЭДС поворачиваются на 180° относительно оси *1—1*, перпендикулярной вектору ЭДС *BC*, а векторные диаграммы вторичных ЭДС поворачиваются на 180° относительно оси *2—2*, параллельной оси *1—1*.

При перекрещивании двух фаз первичной обмотки относительное расположение векторных диаграмм ЭДС обеих обмоток трансформатора не меняется, меняется лишь порядок чередования фаз в обеих обмотках.

Кроме этого, в обоих рассматриваемых случаях при перекрещивании двух фаз первичной обмотки один вектор вторичного линейного напряжения (*ab*) поворачивается по направлению вращения векторов на 120°, а другой вектор (*bc*) — на 120° против направления вращения векторов.

Если же после этого перекрестить две фазы вторичной

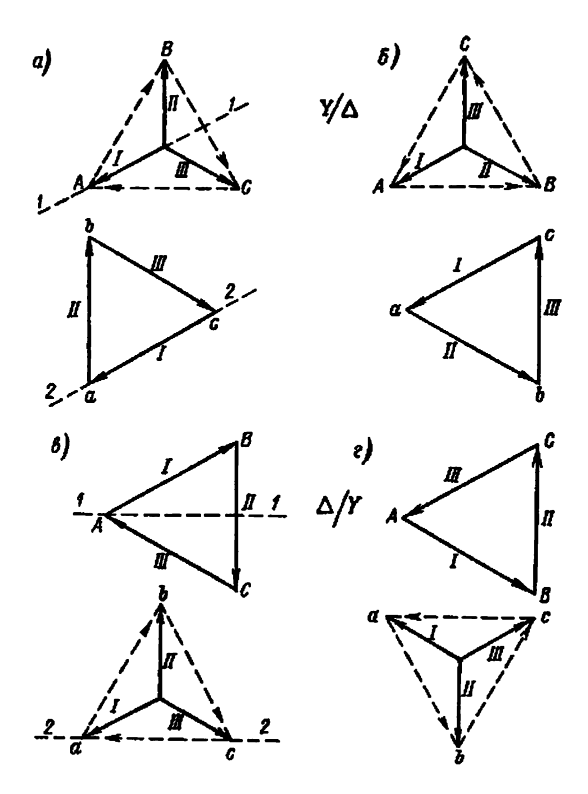


Рис. П3-5. Пояснение возможности параллельного включения трансформаторов нечетных групп

обмотки, например *ca*, то один вектор (*bc*) линейного напряжения повернется на 60° по направлению вращения векторов, а другой (*ab*) — на 60° против направления вращения векторов, причем направление вращения векторов вторичного напряжения восстановится прежним.

Таким образом, перекрещивая две фазы первичной и две фазы вторичной обмоток, можно изменить фазу вторичных ЭДС трансформаторов нечетных групп на ±120°; ±60°.

В качестве примера рассмотрим случай переключения обмоток трансформатора группы Y/Δ-5 для параллельного включения с трансформатором группы Y/Δ-11 (рис. П3-6, *а*). На рис. П3-6, *б*, *в* и *г* дано последовательное построение векторных диаграмм. При перекрещивании фаз *B* и *C* векторы ЭДС первичной обмотки поворачиваются на 180° вокруг оси *I* — *I*, а векторы ЭДС вторичной обмотки — вокруг линии *ac* (рис. П3-6, *б* и *в*);

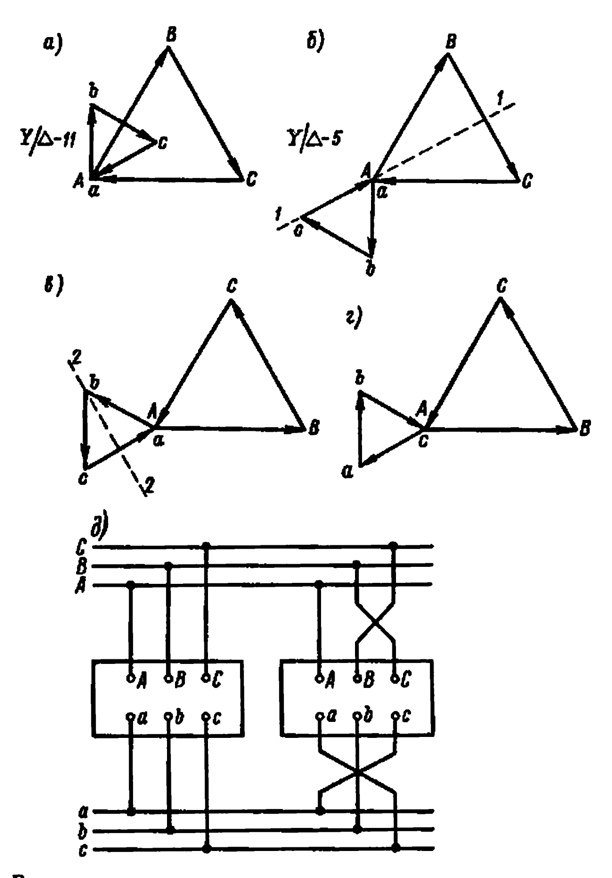


Рис. П3-6. Векторные диаграммы и схема присоединения выводов для параллельного включения трансформаторов групп Y/Δ-5 и Y/Δ-11

при перекрещивании фаз *c* и *a* векторы вторичных ЭДС трансформатора поворачиваются на 180° вокруг оси *2—2*.

Таким образом, треугольник векторов вторичных ЭДС (рис. П3-6, *г*) совпадает с таким же треугольником трансформатора группы Y/Δ-11 (рис. П3-6, *а*); направление вращения этих векторов такое же.

Схема выполнения пересоединений показана на рис. П3-6, *д*.

Г. ФАЗИРОВКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Включение трансформатора на параллельную работу после его монтажа, а также после работ, связанных с возможностью нарушения фазировки (капитальный ремонт со сменой обмоток,

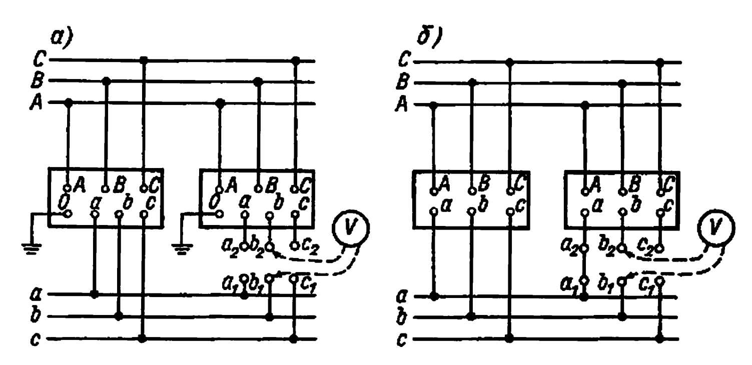


Рис. П3-7. Фазировка трансформаторов с заземленными (*а*) и изолированными (*б*) нейтралями

отсоединение кабелей, прокладка нового кабеля и пр.), допустимо только после предварительной фазировки, т. е. после того, как будет проверено совпадение по фазе вторичных напряжений у двух трансформаторов, присоединенных со стороны высшего напряжения к одной и той же сети.

При фазировке проверяют симметричность подведенных для фазировки напряжений (каждой из фазируемых сторон в отдельности) и находят попарно выводы, между которыми нет разницы напряжений.

Мы рассмотрим лишь фазировку трансформаторов, имеющих обмотку низшего напряжения до 380 В. В этом случае фазировка производится только со стороны низшего напряжения.

В обмотках низшего напряжения должны быть предварительно соединены перемычкой какие-нибудь два вывода для получения замкнутого контура. У трансформаторов, имеющих заземление нейтралей, таким соединением является соединение нейтралей через землю (других соединений делать не следует, так как соединение двух неодинаковых фаз является коротким замыканием).

Если заземление нейтралей отсутствует у обоих трансформаторов, то соединяют перемычкой любые два вывода фазируемых трансформаторов. Фазируемые трансформаторы питаются со стороны высшего напряжения. Схемы соединений для обоих случаев даны на рис. П3-7.

При фазировке трансформаторов с заземленными нейтралями (рис. П3-7, *а*) измеряют напряжение между выводом a_1 и тремя выводами a_2, b_2, c_2, между выводом b_1 и этими же тремя выводами.

При фазировке трансформаторов без заземленных нейтралей (рис. П3-7, *б*) ставят перемычку в последовательном по-

Таблица П3-4

Векторные диаграммы напряжений при фазировке трансформаторов с заземленными нейтралями

$U_{a_1a_2}=0$ $U_{a_1b_2}=U$ $U_{a_1c_2}=U$ $U_{b_1a_2}=U$ $U_{b_1b_2}=0$ $U_{b_1c_2}=U$	$U_{a_1a_2}=0{,}3U$ $U_{a_1b_2}=0{,}8U$ $U_{a_1c_2}=1{,}1U$ $U_{b_1a_2}=1{,}1U$ $U_{b_1b_2}=0{,}3U$ $U_{b_1c_2}=0{,}8U$	$U_{a_1a_2}=1{,}15U$ $U_{a_1b_2}=0{,}58U$ $U_{a_1c_2}=0{,}58U$ $U_{b_1a_2}=0{,}58U$ $U_{b_1b_2}=1{,}15U$ $U_{b_1c_2}=0{,}58U$
Трансформаторы одинаковых групп соединений. Параллельное включение возможно при соединении выводов a_1 и a_2, b_1 и b_2, c_1 и c_2	Трансформаторы разных групп (четная и нечетная); векторы вторичных ЭДС сдвинуты на 30°. Параллельное включение невозможно	Трансформаторы разных групп; векторы вторичных ЭДС сдвинуты на 180°. Параллельное включение возможно для нечетных групп путем пересоединения концов, подводимых к трансформатору со стороны высшего и низшего напряжения; для четных групп необходимо внутреннее пересоединение обмотки

рядке между выводами a_2-a_1, a_2-b_1, a_2-c_1 и измеряют напряжение между четырьмя парами других выводов.

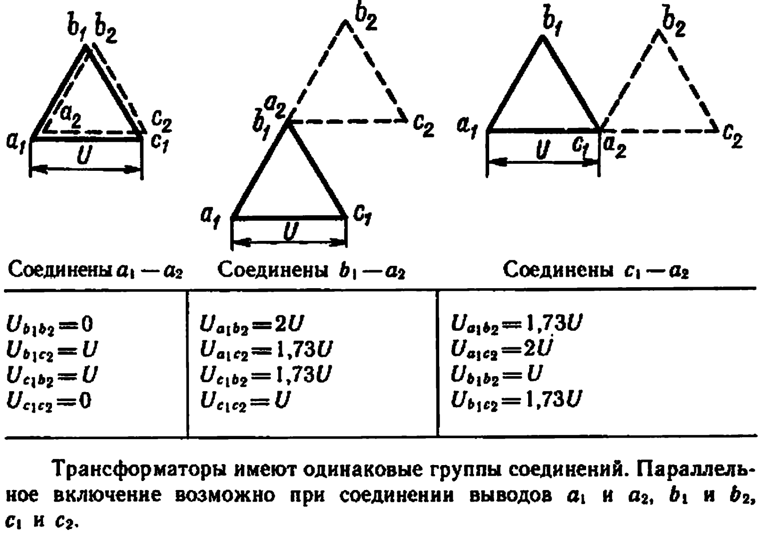
На основании этих измерений строят векторные диаграммы и по ним судят о возможности параллельного включения.

В табл. П3-4 и П3-5 приведены векторные диаграммы для различных случаев фазировки и дана оценка результатов измерений.

Для осуществления параллельного включения трансформаторов предварительное определение групп трансформаторов является необязательным, так как в процессе фазировки пред-

Таблица П3-5

Векторные диаграммы напряжений при фазировке трансформаторов без заземленных нейтралей

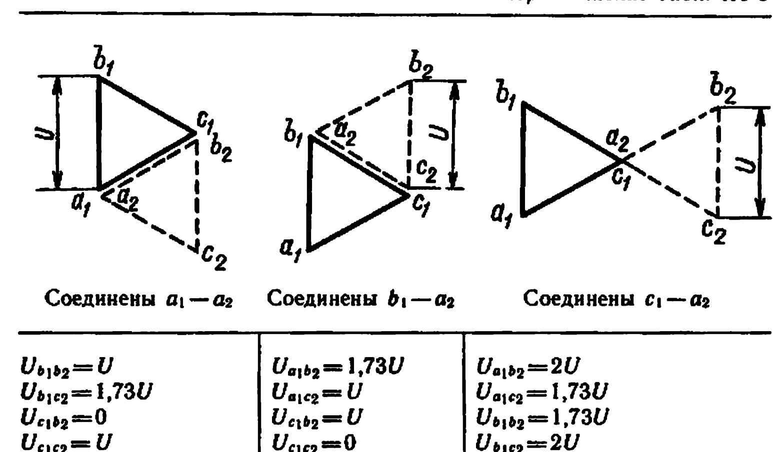


Соединены $a_1 - a_2$	Соединены $b_1 - a_2$	Соединены $c_1 - a_2$
$U_{b_1b_2}=0$	$U_{a_1b_2}=2U$	$U_{a_1b_2}=1{,}73U$
$U_{b_1c_2}=U$	$U_{a_1c_2}=1{,}73U$	$U_{a_1c_2}=2U$
$U_{c_1b_2}=U$	$U_{c_1b_2}=1{,}73U$	$U_{b_1b_2}=U$
$U_{c_1c_2}=0$	$U_{c_1c_2}=U$	$U_{b_1c_2}=1{,}73U$

Трансформаторы имеют одинаковые группы соединений. Параллельное включение возможно при соединении выводов a_1 и a_2, b_1 и b_2, c_1 и c_2.

Соединены $a_1 - a_2$	Соединены $b_1 - a_2$	Соединены $c_1 - a_2$
$U_{b_1b_2}=2U$	$U_{a_1b_2}=0$	$U_{a_1b_2}=U$
$U_{b_1c_2}=1{,}73U$	$U_{a_1c_2}=U$	$U_{a_1c_2}=0$
$U_{c_1b_2}=1{,}73U$	$U_{c_1b_2}=U$	$U_{b_1b_2}=1{,}73U$
$U_{c_1c_2}=2U$	$U_{c_1c_2}=1{,}73U$	$U_{b_1c_2}=U$

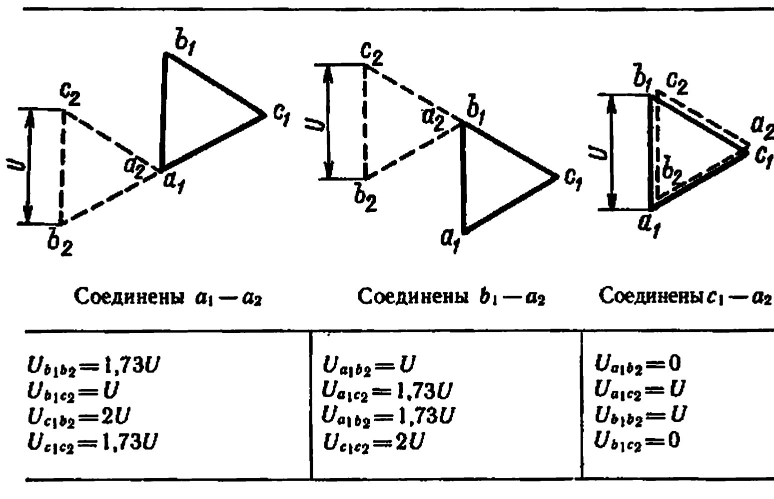
Трансформаторы имеют разные группы соединений; векторы вторичных ЭДС сдвинуты на 180°. Параллельное включение возможно для нечетных групп путем пересоединения концов, подводимых к трансформатору со стороны высшего и низшего напряжения; для четных групп необходимо внутреннее пересоединение обмотки.



Соединены a_1-a_2 | Соединены b_1-a_2 | Соединены c_1-a_2

$U_{b_1b_2}=U$ $U_{b_1c_2}=1{,}73U$ $U_{c_1b_2}=0$ $U_{c_1c_2}=U$	$U_{a_1b_2}=1{,}73U$ $U_{a_1c_2}=U$ $U_{c_1b_2}=U$ $U_{c_1c_2}=0$	$U_{a_1b_2}=2U$ $U_{a_1c_2}=1{,}73U$ $U_{b_1b_2}=1{,}73U$ $U_{b_1c_2}=2U$

Трансформаторы имеют разные группы соединений; векторы вторичных ЭДС сдвинуты на 60°. Параллельное включение возможно между трансформаторами нечетных групп (например, Y/Δ-11 и Y/Δ-1) путем пересоединения концов, подводимых к трансформатору со стороны высшего и низшего напряжения.

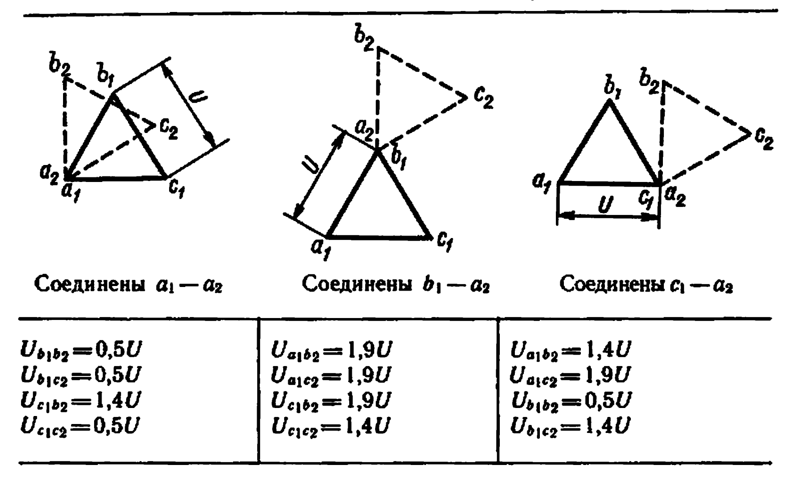


Соединены a_1-a_2 | Соединены b_1-a_2 | Соединены c_1-a_2

$U_{b_1b_2}=1{,}73U$ $U_{b_1c_2}=U$ $U_{c_1b_2}=2U$ $U_{c_1c_2}=1{,}73U$	$U_{a_1b_2}=U$ $U_{a_1c_2}=1{,}73U$ $U_{a_1b_2}=1{,}73U$ $U_{c_1c_2}=2U$	$U_{a_1b_2}=0$ $U_{a_1c_2}=U$ $U_{b_1b_2}=U$ $U_{b_1c_2}=0$

Трансформаторы имеют разные группы соединений; векторы вторичных ЭДС сдвинуты на 120°. Параллельное включение возможно путем пересоединения концов, подводимых к трансформатору со стороны высшего и низшего напряжения.

Продолжение табл. П3-5



Соединены $a_1 - a_2$	Соединены $b_1 - a_2$	Соединены $c_1 - a_2$
$U_{b_1b_2}=0,5U$ $U_{b_1c_2}=0,5U$ $U_{c_1b_2}=1,4U$ $U_{c_1c_2}=0,5U$	$U_{a_1b_2}=1,9U$ $U_{a_1c_2}=1,9U$ $U_{c_1b_2}=1,9U$ $U_{c_1c_2}=1,4U$	$U_{a_1b_2}=1,4U$ $U_{a_1c_2}=1,9U$ $U_{b_1b_2}=0,5U$ $U_{b_1c_2}=1,4U$

Трансформаторы имеют разные группы соединений (четную и нечетную); векторы вторичных ЭДС сдвинуты на 30°. Параллельное включение невозможно.

ставляется возможным выяснить, могут ли трансформаторы быть включены параллельно и какие пересоединения необходимо выполнить для такого включения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

УСТАНОВКА ЩЕТОК И ТРАВЕРСЫ У МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. УХОД ЗА КОЛЛЕКТОРОМ, КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ И ЩЕТКАМИ

Правильное положение щеток может быть достигнуто правильной установкой траверсы и щеткодержателей. Последние нужно устанавливать на пальцах траверсы или бракетах так, чтобы ось расположения щеток была параллельна оси коллектора. Для этого нужно одинаковые щеткодержатели установить по линейке, расположенной параллельно оси коллектора.

Установка радиальных щеткодержателей не зависит от направления вращения якоря. Установка реактивных щеткодержа-

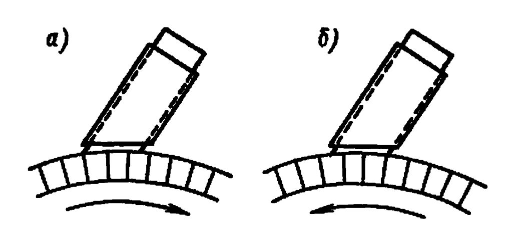
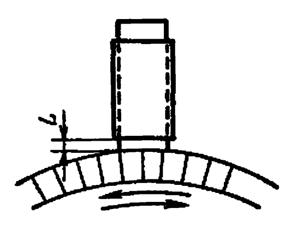


Рис. П4-1. Правильная (*а*) и неправильная (*б*) установка реактивного щеткодержателя

телей (наклоненных к вертикали под углом 30—40°) зависит от направления вращения якоря. При правильной установке острый край щетки направлен против направления вращения, т. е. этот край является набегающим. На рис. П4-1, *а* показана правильная установка реактивного щеткодержателя, а на рис. П4-1, *б* — неправильная. Направление вращения в обоих случаях показано стрелкой.

Наклонные щеткодержатели (с углом наклона не более 15°) устанавливаются так, чтобы острый край щетки был направлен по вращению коллектора, т. е. острый край щетки должен быть сбегающим.

Щетки должны быть так установлены по окружности коллектора, чтобы расстояния между сбегающими краями щеток соседних бракетов траверсы были практически одинаковы. В противном случае может быть искрение под щетками, так как они замыкают накоротко витки обмотки, несколько сдвинутые с нейтрали. Для правильной установки щеток нужно на коллектор, под щетки, положить полоску бумаги, размеченную на равные части соответственно числу бракетов. Производить проверку равномерной установки щеток по окружности по числу коллекторных пластин, заключенных между сбегающими краями щеток соседних бракетов, не следует, так как это может дать ошибку. Указанным способом можно выдержать одинаковые расстояния между соседними рядами щеток с точностью ±1 мм, что является достаточным для нормальной работы машины.



Расстояние *L* от обоймы щеткодержателя до поверхности коллектора (рис. П4-2) должно составлять 2,5—3 мм у крупных машин, 1,5—2,5 мм

Рис. П4-2. Расстояние от обоймы щеткодержателя до поверхности коллектора

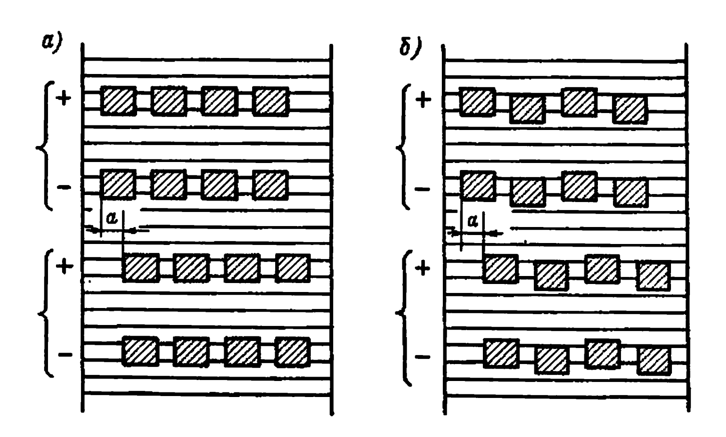


Рис. П4-3. Шахматная (*а*) и шахматно-ступенчатая (*б*) расстановка щеток на коллекторе

у машин типа ПН28,5—ПН550 и около 1 мм у машин типа ПН5—ПН17,5.

Причиной искрения под щетками может быть повышенный зазор между щеткой и обоймой щеткодержателя или, наоборот, защемление щетки в щеткодержателе при работе. Нормальный зазор между щеткой и обоймой составляет 0,2—0,3 мм.

Так как износ коллектора под положительными и отрицательными щетками неодинаков, то, чтобы сделать его равномерным, нужно, чтобы щетки каждой пары смежных бракетов (ряд положительных и ряд отрицательных) работали друг за другом (по одному щеточному следу), а щетки следующей пары бракетов — по другому щеточному следу, сдвинутому относительно первой пары на величину *a*, и т. д. Расстановка щеток на коллекторе показана на рис. П4-3, *а*. Перекрытие *a* нужно выбрать с таким расчетом, чтобы щетки работали по всей поверхности коллектора. В многополюсных машинах щетки можно устанавливать с меньшим сдвигом, но так, чтобы полное перекрытие промежутков между щетками было достигнуто суммарным сдвигом нескольких пар бракетов. На рис. П4-3, *б* показана расстановка щеток для случая их ступенчатого расположения, применяемого иногда в крупных машинах.

При осевых сдвигах якоря щетки крайних щеткодержателей не должны свисать над выточкой в коллекторе со стороны обмотки якоря и не должны выступать за наружный край коллектора.

Нажатие на щетку, создаваемое пружиной щеткодержателя, должно соответствовать определенному удельному давлению, зависящему от марки щеток и от окружной скорости кол-

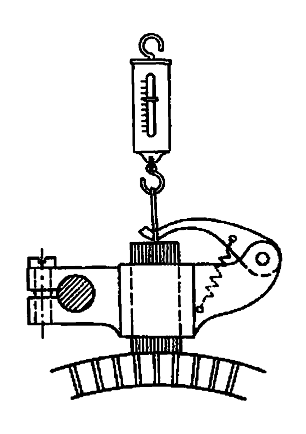


Рис. П4-4. Проверка нажатия щеток динамометром

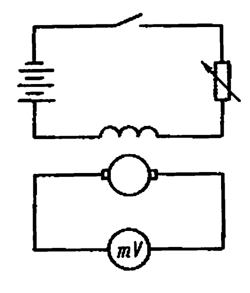


Рис. П4-5. Схема для установки траверсы

лектора или контактных колец. Для уменьшения механических потерь на коллекторе или кольцах стремятся установить минимальное нажатие, при котором щетки работают без искрения. Следует также учесть, что чем больше окружная скорость, тем бо́льшим устанавливают нажатие, чтобы щетки могли следовать за всеми неровностями на поверхности коллектора или колец и удовлетворительно работали при возможных вибрациях щеткодержателей. Разница в нажатии на отдельные щетки не должна превышать 10 % среднего его значения. Проверка нажатия щеток производится динамометром (рис. П4-4), закрепленным за рычажок щеткодержателя, прижимающий щетку к коллектору. Значение нажатия может быть определено, если между щеткой и коллектором проложить лист бумаги и производить постепенное натяжение динамометра; показание динамометра, при котором бумага может быть легко изъята, и будет соответствовать нажатию щетки на коллектор.

Щетки машины постоянного тока должны быть установлены на нейтрали. Проверку правильного положения траверсы производят индуктивным методом при неподвижной машине, после предварительной пришлифовки щеток к коллектору. Траверсу устанавливают предварительно в таком положении, чтобы линия щеток приходилась примерно против середины главных полюсов (имеются в виду обычные обмотки с симметричными лобовыми частями). Обмотку возбуждения отключают, к ней через реостат от аккумуляторной батареи (рис. П4-5) подводят постоянный ток. Значение тока в обмотке не должно превышать примерно 5—10 % номинального, что важно для предотвращения пробоя

обмотки экстратоками размыкания. К зажимам якоря присоединяют милливольтметр на 45—60 мВ с добавочным сопротивлением для напряжения 1,5—3 В (желательно с нулем посредине шкалы). Затем производят замыкание и размыкание тока возбуждения; при этом в якоре индуктируется ЭДС трансформации и стрелка прибора отклоняется в ту или другую сторону в зависимости от положения щеток. При щетках, находящихся на нейтрали, ЭДС должна быть практически равна нулю. Траверсу со щетками передвигают до тех пор, пока не будет достигнуто это положение щеток.

Лучше всего ориентироваться по показаниям прибора в момент отключения, так как показания при этом получаются более отчетливыми, а направление отклонения стрелки прибора дает возможность после нескольких проб определить, в какую сторону следует перемещать траверсу для ее правильной установки. Перед началом испытания милливольтметр должен быть включен с добавочным сопротивлением. По мере перемещения траверсы и уменьшения отклонений стрелки прибора постепенно уменьшают и его пределы измерений.

Рекомендуется проверять правильность положения траверсы при различных положениях якоря. Якорь следует поворачивать в одном и том же направлении во избежание влияния на показания прибора возможного перемещения щеток в щеткодержателях. Закрепив траверсу, опять проверяют правильность ее положения. После окончательной приработки щеток к поверхности коллектора положение нейтрали проверяют еще раз.

Если машина может быть пущена в ход, то правильность установки траверсы можно проверить при работе вхолостую либо в качестве генератора, либо в качестве двигателя. Если машина работает в качестве генератора при неизменном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и неизменной частоте вращения, то напряжение на зажимах якоря будет наибольшим при положении щеток на нейтрали. Если машина работает в качестве двигателя, то положению щеток на нейтрали соответствует одинаковая частота вращения якоря в обоих направлениях (вперед и назад) при одинаковом напряжении и одинаковом токе возбуждения.

Коллектор, контактные кольца и щетки требуют тщательного ухода. Они должны быть всегда чистыми. Особенно вредна для них металлическая и угольная проводящая пыль, которая, смешиваясь с попавшим на контактные поверхности маслом, образует грязь и вызывает искрение.

Коллектор и контактные кольца можно чистить на ходу машины при помощи дощечки, обернутой сухой тряпкой. При этом следует соблюдать правила безопасности, заключающиеся

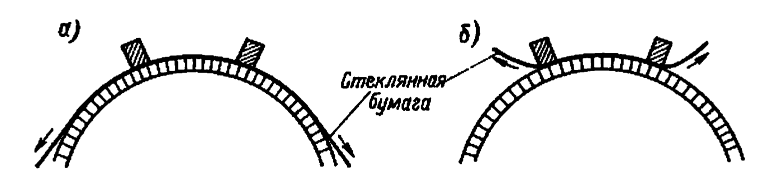


Рис. П4-6. Правильная (*а*) и неправильная (*б*) пришлифовка щеток

в том, чтобы изолировать себя от соприкосновения с токопроводящими частями и не задевать руками и одеждой вращающиеся части машины.

Угольные щетки должны иметь зеркально блестящую поверхность на всей площади соприкосновения с коллектором или контактными кольцами. Сработавшиеся щетки нужно заменять щетками той же марки.

Щетки должны быть притерты к поверхности коллектора или контактных колец. Для этого под щетки 2—3 бракетов траверсы подкладывают стеклянную бумагу, обращенную рабочей стороной к щеткам; после этого бумагу передвигают взад и вперед при нормальном давлении пружин на щетки.

Применение наждачного или карборундового полотна для пришлифовки щеток недопустимо. Для правильной притирки щеток концы бумаги нужно отогнуть вниз (рис. П4-6, *а*), так как при отгибании бумаги вверх (рис. П4-6, *б*) края щеток будут опилены и уменьшится активная ширина щеток, что может вызвать искрение на коллекторе. Притирку щеток твердых марок начинают с более крупных номеров бумаги и кончают более мелкими, лишь щетки мягких марок пришлифовываются мелкими номерами бумаги. После притирки щеток производятся очистка и продувка сжатым воздухом коллектора, контактных колец, щеток и щеткодержателей для удаления угольной пыли и зерен стекла.

При продувке имеет место, однако, крайне вредный перенос угольной пыли из одной части машины в другую; во избежание этого нужно по возможности применять для чистки машины пылесос.

Контактные поверхности коллектора и контактных колец должны быть строго цилиндрическими и иметь гладкий, полированный вид, без неровностей, царапин и горелых мест; слюда между коллекторными пластинками не должна выступать за поверхность коллектора. Допустимое биение коллекторов быстроходных машин с окружной скоростью до 50 м/с, например турбовозбудителей, не должно превышать 0,02—0,03 мм, в тихоходных машинах может быть допущено, без ущерба для

работы машины, значительно большее биение — порядка 0,1—0,2 мм. При большом биении коллектора производят обточку его резцом или шлифовку, а при биении и неровностях до 0,5 мм — шлифовку (проверку биения коллектора см. в приложении 12).

Перед проточкой коллектора его следует нагреть до 100° С, затянуть в нагретом состоянии, затем дать ему остыть и снова затянуть. Затягивать следует только ослабевшие болты. Чрезмерное затягивание болтов (шпилек) коллектора может вызвать ненормальную деформацию коллектора.

Проточку коллектора производят при скорости резания примерно 90 м/мин и подаче не более 0,05—0,1 мм на оборот. Коллекторы крупных машин протачивают высококачественными резцами при вращении якоря в своих подшипниках; суппорт токарного станка пристраивают у коллектора и устанавливают так, чтобы резец был обращен режущей кромкой вверх, немного выше центра. Перед проточкой коллектора желательно предварительно «продорожить» (см. ниже) его с тем, чтобы затяжка меди не затрудняла операцию продороживания коллектора после проточки.

Шлифовку коллектора производят мелкозернистыми камнями, укрепленными неподвижно в суппорте, либо вращающимся карборундовым мелкозернистым кругом диаметром 150—300 мм, установленным на специальном приспособлении или суппорте; целость круга следует проверить, а работу производить при наличии достаточно прочных предохранительных щитков. При шлифовке коллектора неподвижным камнем оптимальная окружная скорость коллектора находится в пределах 10—20 м/с, шлифовка может производиться также и при номинальной окружной скорости. При шлифовке коллектора при помощи вращающегося круга последний должен вращаться навстречу коллектору, подача должна быть весьма незначительной.

При наличии царапин, нагара и прочих местных дефектов коллектор подвергается полировке. Этой операции коллектор подвергается и после проточки или шлифовки. Полировка устраняет следы обработки коллектора (резцом или камнем) и создает благоприятные условия для образования оксидной пленки («политуры») на его поверхности, необходимой для правильной работы коллектора и щеток. Полировку производят при номинальной частоте вращения, применяя мелкую стеклянную бумагу № 00.

Для полировки коллектора стеклянную бумагу прикрепляют к деревянной колодке (рис. П4-7), которую пригоняют точно по диаметру коллектора; ширину бруска выбирают такой, чтобы он мог свободно помещаться между щетками двух соседних бракетов. Колодку прижимают к вращающемуся коллектору. По до-

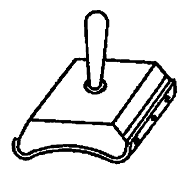


Рис. П4-7. Колодка для полировки коллектора

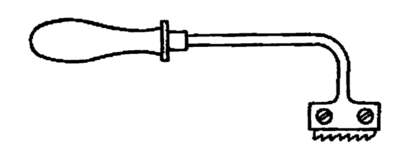


Рис. П4-8. Пилка для выпиливания слюды в коллекторе

стижении гладкой поверхности коллектор очищают и продувают сжатым воздухом, к колодке прикрепляют новую стеклянную бумагу, на которую наносят тонкий слой чистого вазелина, и продолжают полировку до получения поверхности равномерного темного цвета. Все сказанное относительно требований, предъявляемых к коллектору и его обработке, относится также и к контактным кольцам. Разница лишь в одном: в связи с более легкими условиями работы контактных колец для них может быть допущено несколько большее биение.

Слюду (миканит) между коллекторными пластинами выпиливают на глубину 1,5—2 мм; эта операция называется продороживанием коллектора. Продороживание можно производить либо специальной фрезой, вращаемой небольшим электродвигателем, либо вручную — при помощи специальной пилки (рис. П4-8), которую обычно изготовляют из небольшого куска ножовочного полотна (без развода зубцов) и зажимают в рукоятку. Пропиливание слюды должно быть выполнено по рис.

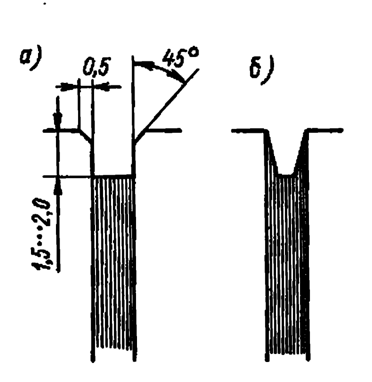


Рис. П4-9. Правильное (*а*) и неправильное (*б*) выпиливание слюды в коллекторе

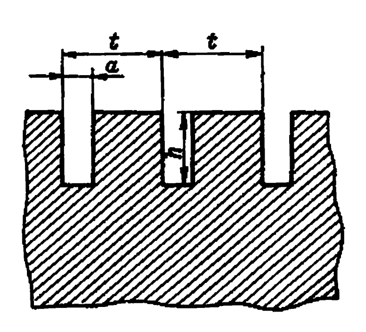


Рис. П4-10. Винтовая канавка на коллекторе

П4-9, *а*, а не по рис. П4-9, *б*; в последнем случае после небольшого износа коллектора слюда будет выступать за его пределы. Края коллекторных пластин надо притупить шабером под углом приблизительно 45° на ширину не более 0,5 мм.

Иногда, особенно у быстроходных машин, даже тщательное выполнение указанных мероприятий с целью обеспечения нормальной работы щеток на контактных кольцах не приводит к желаемым результатам: продолжается сильное искрение, имеют место повышенный нагрев и накал щеток, а также сильный износ щеток и контактных колец.

Хорошим средством для улучшения коммутации является винтовая канавка на коллекторе и особенно на кольцах (рис. П4-10).

Она непрерывно в процессе работы машины очищает зеркало щетки от продуктов подгара и образует под щеткой канал, через который интенсивно охлаждается контактная поверхность щетки. В результате этого резко улучшается коммутация и уменьшается износ щеток и колец. Известны случаи, когда удалось добиться нормальной работы щеток на кольцах быстроходных роторов только после нарезки винтовых канавок.

Шаг t канавки рекомендуется принимать от 10 до 25 мм, ширину a — от 3 до 4 мм, а глубину h — в зависимости от предусмотренного припуска на обточку кольца. Например, на стальных кольцах роторов турбогенераторов при частоте вращения 3000 об/мин и толщине кольца около 50 мм принимают глубину равной 7,5 мм, шаг — 10 мм и ширину канавки — 3 мм; на бронзовых кольцах машины при 6000 об/мин и толщине кольца около 35 мм принимают глубину равной 3,5 мм, шаг и ширину канавки — также 10 и 3 мм.

После нарезки канавки необходимо вырубить тонкие (меньше 2 мм) буртики и притупить острые кромки.

Перед производством работ по проточке, шлифовке и полировке коллектора или контактных колец должны быть приняты соответствующие меры для предотвращения попадания стружки и абразивной пыли внутрь машины; по окончании этих работ необходимо произвести осмотр, чистку и продувку машины сжатым воздухом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ЩЕТКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Выбор марки и конструкции щеток в значительной степени влияет на работу электрической машины и определяет надежность ее эксплуатации.

Для устранения дефектов работы щеточного контакта данной конкретной машины необходимо учитывать разнообразные свойства и характеристики различных марок и конструкций щеток, выбирая оптимальные варианты.

Таблица П5-1

Обозначение марок щеток	Условное обозначение марок	Наименование групп марок	Преимущественная область применения
Г20 Г21 Г22	20 34 32	Угольно-графитные	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3 611М 6110М	43 88 56	Графитные	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А ЭГ24Ф ЭГ4 ЭГ8 ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74АФ ЭГ85	12 68 14 18 41 51 61 71 74 79 85	Электрографитированные	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
М1 М3 М6 М20	81 83 86 93	Металлографитные	Низковольтные генераторы и контактные кольца

Обозначение марок щеток	Условное обозначение марок	Наименование групп марок	Преимущественная область применения
МГ МГ2 МГ4 МГС5 МГС0	17 82 19 9 21	Металлографитные	Низковольтные генераторы и контактные кольца

Примечания. 1. Физико-механические и коллекторные характеристики щеток, а также другие технические и эксплуатационные требования и оценки, необходимые при выборе щеток, определяются по ГОСТ 2332—75. 2. Типы, основные размеры и конструкции щеток должны соответствовать ГОСТ 12232.1—77, ГОСТ 12232.2—77, ГОСТ 12232.4—76 — ГОСТ 12232.8—76 и нормативно-технической документации, утвержденной в установленном порядке.

Преимущественные области применения щеток в соответст вии с ГОСТ 2332—75 приведены в табл. П5-1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

НАМАГНИЧИВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

При первом пуске генераторы с самовозбуждением иногда не возбуждаются из-за отсутствия остаточного магнетизма.

В некоторых случаях генераторы не возбуждаются после размагничивания, имевшего место при работе (см. п. 1-8-1).

Генераторы, утратившие остаточный магнетизм, должны быть заново и правильно намагничены от постороннего источника тока. Намагничивание производится следующим образом: через параллельную обмотку неподвижной машины пропускают ток от постороннего источника, например от аккумуляторной батареи или от любого имеющегося источника постоянного тока. Если ток приходится брать от осветительной сети, от другого работающего генератора или от аккумуляторной батареи значительного напряжения, то включение и выключение необходимо производить через реостат.

В генераторах последовательного или смешанного возбуждения иногда удается восстановить утерянный остаточный магнетизм мгновенным коротким замыканием генератора. Замыкание должно производиться через предохранитель или максимальный выключатель, действующий при 100—150 % номинального тока генератора.

Для сохранения правильной полярности машины положительный полюс постороннего источника тока следует присоединить к зажиму Ш1 или Ш2 параллельной обмотки или к зажиму С1 и С2 последовательной обмотки в зависимости от номинального направления вращения якоря и принятой схемы соединений обмоток (см. приложение 1).

Если после намагничивания генератор не возбуждается и имеется уверенность в том, что концы обмотки возбуждения подключены правильно, то, чтобы сохранить прежнюю полярность машины, необходимо намагнитить полюсы в обратном направлении.

Если генератор работает параллельно с другими генераторами, то после намагничивания перед включением в сеть необходимо проверить его полярность.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

УСТРАНЕНИЕ ИСКРЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. МЕТОДИКА УСТРАНЕНИЯ ИСКРЕНИЯ

Причины искрения на коллекторе, указанные в § 1-1, являются основными, но не исчерпывающими. Искрение может появиться от самых разнообразных причин, в том числе и от химического состояния среды [20], в которой машина работает; кроме того, искрение может появиться внезапно или даже изменяться с течением времени. В некоторых случаях для выявления причин искрения приходится длительно вести наблюдения за работой коллектора и щеток. Учитывая многообразие причин искрения, нельзя указать исчерпывающие способы распознавания этих причин. Здесь мы ограничимся некоторыми общими указаниями.

Прежде всего необходимо дать правильную оценку степени искрения.

Таблица П7-1

Степень искрения (класс коммутации)	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
$1\,^1/_4$	Слабое точечное искрение под небольшой частью края щетки	
$1\,^1/_2$	Слабое искрение под большей частью края щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

В соответствии с нормами (ГОСТ 183—74) искрение на коллекторе электрической машины должно оцениваться по степени искрения под сбегающим краем щетки и по шкале (классам коммутации), указанной в табл. П7-1.

При номинальном режиме работы машины степень искрения должна быть не выше $1\,^1/_2$, если она не оговорена в соответствующем стандарте или в технических условиях на данную машину.

Таким образом, основным критерием для оценки степени искрения служит состояние рабочей поверхности коллектора и щеток.

Полезным может оказаться наблюдение за цветом искр.

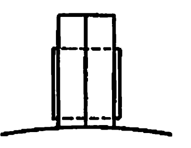
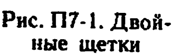



Рис. П7-1. Двойные щетки

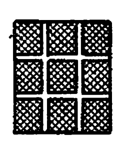


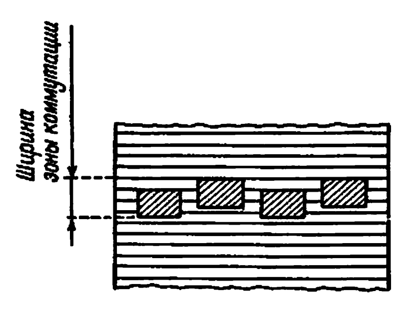
Рис. П7-2. Надрезы на рабочей поверхности щеток

Небольшое искрение, наблюдаемое часто на сбегающем крае щетки, не представляет собой никакой опасности, причем в этом случае искры обычно имеют белый или голубовато-белый цвет, они небольшого размера («точечное искрение»). Вытянутые искры желтоватого оттенка на многих щетках свидетельствуют о неправильной коммутации. Зеленая окраска искр и наличие меди на зеркале щеток являются следствием сгорания меди и указывают на механические причины искрения, например выступание коллекторных пластин, эксцентричность коллектора, вибрацию щеток и т. п.

Для выявления причин искрения под щетками необходимо произвести тщательное обследование машины и устранить все дефекты в скользящем контакте и в электрической и магнитных цепях машины. Лишь после этого приступают к исследованию коммутации по методу безыскровой зоны и к регулировке добавочных полюсов (см. разд. Б). Если после устранения всех дефектов и регулировки добавочных полюсов коммутация машины все же неудовлетворительная, то приходится изменять марку щеток и применять слоистые и разрезные (двойные) щетки.

Через щетку по направлению к щеточному токоподводу (назовем это направление продольным) проходит ток нагрузки; поперек щетки замыкается ток коммутируемых секций. Для улучшения коммутации желательно неодинаковое сопротивление щетки в указанных направлениях, а именно увеличенное — в поперечном направлении и уменьшенное — в продольном. Такая щетка, называемая слоистой, состоит из склеенных изоляционным клеем продольных пластинок щеточного полуфабриката. Она меньше нагревается и имеет меньшее падение напряжения в продольном направлении. Двойная щетка представляет собой две щетки, которые установлены в общем щеткодержателе (рис. П7-1) и могут перемещаться относительно друг друга. Такие щетки благодаря разделяющей их поверхности имеют увеличенное сопротивление для поперечного тока комму-

Рис. П7-3. Расширение коммутационной зоны смещением щеток



тации, а для тока нагрузки — такое же, как и при целой щетке. Разрезные щетки благодаря их меньшей ширине по сравнению с целой щеткой лучше пришлифовываются к коллектору и дают лучший контакт.

Для увеличения поперечного сопротивления щеток можно на рабочей поверхности существующих щеток прорезать несколько взаимно перпендикулярных канавок шириной 1 мм и глубиной 3 мм, как это указано на рис. П7-2. Благодаря этим надрезам улучшается также вентиляция, а следовательно, и охлаждение щеток.

В некоторых случаях улучшения коммутации можно достигнуть, расширяя коммутационную зону или применяя более широкие щетки. Чтобы расширить коммутационную зону, щетки каждого бракета траверсы смещают относительно друг друга по окружности коллектора, располагая их в шахматном порядке (рис. П7-3). В нереверсивных машинах улучшение коммутации может быть иногда достигнуто сдвигом траверсы.

Б. РЕГУЛИРОВКА ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ ПО МЕТОДУ БЕЗЫСКРОВОЙ ЗОНЫ

Метод безыскровой зоны, предложенный В. Т. Касьяновым [12], состоит в том, что определяют такие предельные значения тока добавочных полюсов (наибольшие и наименьшие), в диапазоне которых имеет место безыскровая работа щеток. Чтобы можно было изменять значение и направление тока в обмотке добавочных полюсов независимо от тока нагрузки, обмотку добавочных полюсов и компенсационную отсоединяют и питают от независимого источника либо производят их дополнительную подпитку также от независимого источника (рис. П7-4). В тех случаях, когда имеются достаточные промежутки между главными и добавочными полюсами, можно для создания дополнительного потока (вместо подпитки) намотать на время испытания поверх обмотки добавочных полюсов некоторое число витков

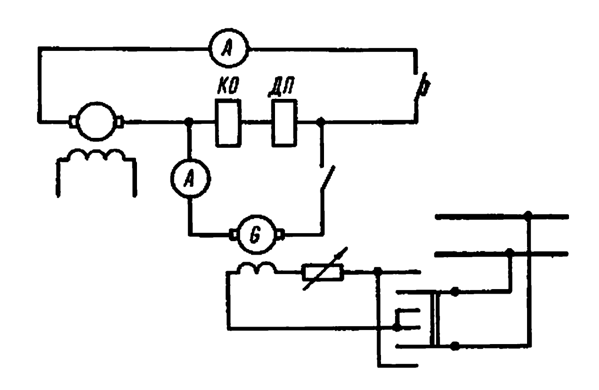


Рис. П7-4. Схема для нахождения зоны безыскровой коммутации

и питать их током. При соответствующем выборе числа витков необходимый ток может оказаться небольшим.

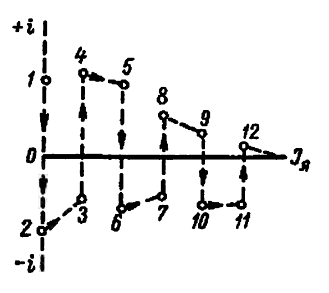
Учитывая, что для независимого питания добавочных полюсов необходим источник весьма низкого напряжения и большой силы тока, а также что наложение самостоятельной обмотки во многих случаях может оказаться невозможным, в крупных машинах применяют главным образом метод подпитки. Ток подпитки обычно не превышает 10—15 % номинального тока машины. Для проведения опыта подпитки (рис. П7-4) низковольтный генератор *G* через амперметр *A* подключают к зажиму обмотки добавочных полюсов *ДП* и компенсационной обмотки *КО*. Генератор имеет независимое возбуждение; в цепи возбуждения имеется переключатель для изменения направления тока подпитки.

Опыт подпитки следует производить при номинальных напряжении и частоте вращения машины, но его можно выполнять и в режиме короткого замыкания при номинальной частоте вращения. В последнем случае необходимо принимать меры против самовозбуждения (см. приложение 10, разд. Г, п. 1), оставив траверсу на нейтрали.

В подавляющем большинстве случаев наладка коммутации, произведенная в режиме короткого замыкания, дает вполне удовлетворительные результаты. Определение на месте установки безыскровой зоны коммутации крупных двигателей с пиковой нагрузкой представляет большие трудности из-за невозможности создать ровную регулируемую нагрузку или перевести машину на работу в качестве генератора в режиме короткого замыкания.

Различают положительную подпитку, когда ток подпитки

Рис. П7-5. Последовательность проведения опыта подпитки добавочных полюсов



создает поток, совпадающий с основным потоком добавочного полюса, и отрицательную, когда создаваемый поток направлен против основного потока. Определение зоны безыскровой коммутации производят при холостом ходе и при токах $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$, $^4/_4$ и $^5/_4$ номинального. Для этого сначала при холостом ходе машины и номинальной частоте вращения производят положительную подпитку, постепенно увеличивая ток подпитки до появления первых искр под сбегающими краями щеток; затем плавно уменьшают ток до нуля и, изменяя направление тока подпитки, производят отрицательную подпитку, также увеличивая ток до появления первых искр. Для точного определения тока подпитки, вызывающего первое искрение, опыт повторяют несколько раз. При холостом ходе токи подпитки разных направлений, вызывающие первое искрение, должны быть при исправном щеточном аппарате примерно одинаковы. Затем, замкнув машину накоротко, повторяют опыт при всех вышеуказанных токах. Последовательность проведения опыта подпитки показана на рис. П7-5.

Необходимо учесть, что в режиме короткого замыкания изменение тока подпитки может заметным образом влиять на ток якоря: при положительной подпитке ток якоря увеличивается, а при отрицательной — уменьшается, что требует регулировки силы тока якоря.

При снятии кривых безыскровой зоны не следует допускать сильного искрения, так как возникающее искрение исчезает не сразу, а лишь при значительном уменьшении тока подпитки, что ведет к ошибочному суждению о ширине безыскровой зоны. Для лучшего наблюдения за искрением рекомендуется затемнить коллектор.

По данным опыта подпитки строят кривые границ безыскровой зоны. На горизонтальной оси откладывают ток якоря, а на вертикальной оси вверх — ток положительной подпитки, вниз — ток отрицательной подпитки. На рис. П7-6, *а* показана зона безыскровой коммутации для случая хорошей коммутации, обе кривые почти симметричны относительно оси абсцисс; рис. П7-6, *б* относится к слишком слабому полю добавочных полюсов, а рис. П7-6, *в* — к слишком сильному полю добавочных полюсов. На рис. П7-6, *г* — показана безыскровая зона при насы-

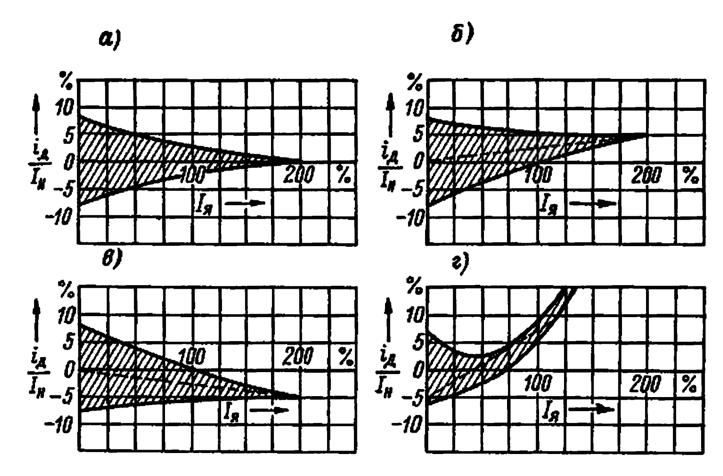


Рис. П7-6. Зоны безыскровой коммутации

щенных добавочных полюсах (когда нет пропорциональности между током нагрузки и полем добавочных полюсов); с увеличением нагрузки границы зоны сильно загибаются кверху.

Рассматривая различные безыскровые зоны, видим, что по мере увеличения тока обе границы зоны сближаются и при некоторой нагрузке пересекаются. За пределами этой точки пересечения безыскровая работа машины невозможна. Чем шире безыскровая зона, тем устойчивее работает машина в отношении коммутации. Быстрое пересечение обеих границ безыскровой зоны свидетельствует обычно о механических неисправностях контакта щеток. Ширина безыскровой зоны и положение точки пересечения зависят также и от частоты вращения: чем меньше частота вращения, тем шире зона безыскровой работы и тем при большем токе пересекаются границы этой зоны.

При хорошей коммутации средняя линия (на рис. П7-6 показана штрихами) безыскровой зоны почти совпадает с осью абсцисс; отклонение ее вверх свидетельствует о слабости поля добавочных полюсов, и действие их должно быть усилено, а отклонение средней линии вниз — о слишком сильном поле добавочных полюсов, и действие их должно быть ослаблено. Регулировка коммутирующего поля добавочных полюсов может производиться следующими способами:

а) изменением числа витков обмотки добавочных полюсов;

б) шунтированием обмотки добавочных полюсов — при слишком сильном поле;

в) изменением зазора между добавочными полюсами и якорем.

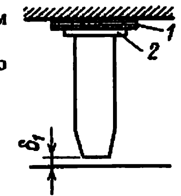


Рис. П7-7. Прокладки между добавочным полюсом и ярмом

1 — стальные прокладки; 2 — прокладки из немагнитного материала

Ослабление добавочных полюсов шунтированием их обмотки в машинах с пиковой нагрузкой сложно и требует специальных расчетов, связанных с соответствующим подбором электромагнитной постоянной времени шунта, необходимой для требуемого распределения токов между обмоткой и шунтом при резком возрастании тока нагрузки.

Обычно регулировку поля добавочных полюсов производят изменением числа или толщины прокладок между полюсами и ярмом. Заводы-изготовители для целей регулировки поля добавочных полюсов часто устанавливают между полюсами и ярмом достаточное число стальных и немагнитных прокладок (рис. П7-7). Для сохранения формы поля добавочных полюсов при его регулировке изменение зазора следует производить таким образом, чтобы общая толщина прокладок между добавочным полюсом и якорем не изменялась; для этого в случае надобности прокладки из немагнитного материала заменяют стальными прокладками или наоборот.

Величина необходимого зазора на основании опыта подпитки добавочных полюсов приближенно определяется по формуле

$$\delta'_{экв} = \delta_{экв} \frac{1}{1 \pm \frac{i_д}{I_я}\left(\frac{D}{D-1}\right)},$$

где $\delta_{экв}$ и $\delta'_{экв}$ — существующий и необходимый эквивалентные зазоры между добавочными полюсами и якорем; $i_д$ — ток подпитки, определяемый по средней линии безыскровой зоны, соответствующий номинальному току якоря; $I_я$ — номинальный ток якоря; D — коэффициент компенсации реакции якоря.

Для компенсированных машин

$$\delta_{экв} \approx \delta_1 + \delta_2.$$

Для некомпенсированных машин

$$\delta_{экв} \approx \delta_1 + 2\delta_2,$$

где δ_1 — существующий средний зазор между башмаком до-

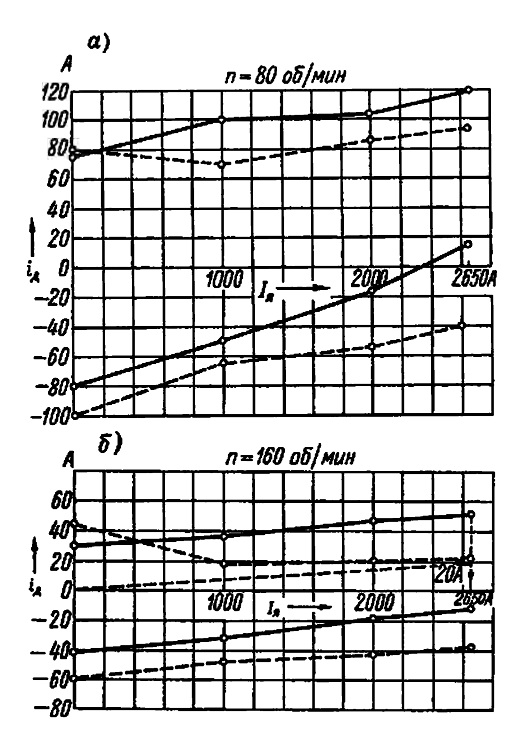


Рис. П7-8. Кривые подпитки добавочных полюсов прокатного электродвигателя при основной (*а*) и максимальной (*б*) частоте вращения

бавочного полюса и якорем; δ_2 — существующий средний зазор (толщина немагнитных прокладок) между сердечником добавочного полюса и станиной;

$$D = \frac{Aw_{д.п} + Aw_{к.о}}{Aw_{реак.я}} = \frac{8ap\,(w_{д.п} + w_{к.о})}{Na_{д.п}},$$

где a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; p — число пар полюсов машины; $w_{д.п}$ — число витков на одном добавочном полюсе; $w_{к.о}$ — число витков компенсационной обмотки на один полюс; N — общее число проводников обмотки якоря; $a_{д.п}$ — число параллельных ветвей в обмотках добавочных полюсов и компенсационной.

При отсутствии компенсационной обмотки $w_{к.о}$ исключается из формулы.

При отсутствии обмоточных данных машины коэффициент D может быть принят равным 1,2.

После установки зазора по указанной выше формуле следует произвести опытную проверку коммутации, снимая повторно кривые подпитки.

Пример. В качестве примера определения необходимой величины зазора между добавочными полюсами и якорем приведем данные стендовой наладки коммутации.

Производилась наладка коммутации регулировкой поля добавочных полюсов прокатного двигателя мощностью 1840 кВт, 750 В, 2650 А, 80/160 об/мин. Кривые подпитки снимались в режиме короткого замыкания для двух частот вращения 80 и 160 об/мин. Зазор между добавочными полюсами и якорем до регулировки $\delta_1=19{,}7$ мм, толщина немагнитных прокладок из гетинакса $\delta_2=10$ мм.

Кривые подпитки при основной частоте вращения 80 об/мин и максимальной 160 об/мин, построенные по данным опыта подпитки, показаны сплошными линиями на рис. П7-8.

По этим кривым подпитки при максимальной частоте вращения видно, что поток добавочных полюсов недостаточен и необходимо уменьшить зазор между полюсами и якорем. Определим величину зазора при необходимом токе подпитки 20 А (при частоте вращения 160 об/мин). Обмотки машины имеют следующие данные:

$$w_{д.п}=6;\ w_{к.о}=6;\ N=1440;\ a=p=6;\ a_{д.п}=2;$$

$$D=\frac{8ap(w_{д.п}+w_{к.о})}{Na_{д.п}}=\frac{8\cdot 6\cdot 6(6+6)}{1440\cdot 2}=1{,}2;$$

$$\delta_{экв}=\delta_1+\delta_2=19{,}7+10=29{,}7 \text{ мм};$$

$$\delta'_{экв}=\delta_{экв}\frac{1}{1+\frac{i_д}{I_я}\left(\frac{D}{D-1}\right)}=$$

$$=29{,}7\frac{1}{1+\frac{20}{2650}\left(\frac{1{,}2}{1{,}2-1}\right)}=28{,}4,$$

т. е. зазор надо уменьшить на величину $\Delta=29{,}7-28{,}4=1{,}3$ мм.

Кривые подпитки, снятые при двух частотах вращения (см. штриховые кривые на рис. П7-8), показывают, что коммутация машины стала удовлетворительной.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

НАХОЖДЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ОБМОТКАХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. **Короткие замыкания в обмотке якоря.** Возможны следующие случаи коротких замыканий: а) замыкание части витков одной секции; б) замыкание всей секции; в) замыкание между двумя секциями, лежащими в одном пазу; г) замыкание в лобовых частях обмотки; д) замыкание между любыми двумя точками обмотки, например в случае пробоя обмотки на корпус в двух точках.

На рис. П8-1, *а* и *б* схематически показано замыкание между витками секций как для петлевой, так и для волновой обмоток. В обоих случаях замыкание в точках *а* и *е* образует короткозамкнутую ветвь *абвгде*.

На рис. П8-2, *а* и *б* схематически показано замыкание между двумя смежными коллекторными пластинами петлевой и волновой обмоток. Замыкание между смежными пластинами

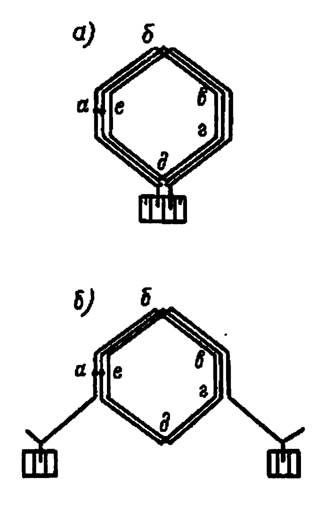


Рис. П8-1. Замыкание между витками в петлевой (*а*) и волновой (*б*) обмотках якоря

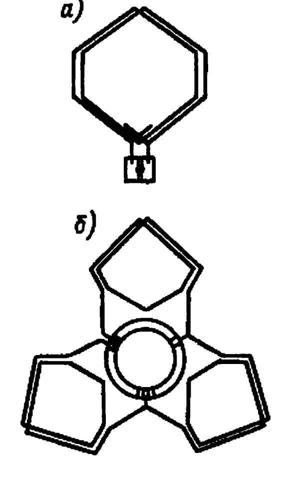


Рис. П8-2. Замыкание между коллекторными пластинами в петлевой (*а*) и волновой (*б*) обмотках

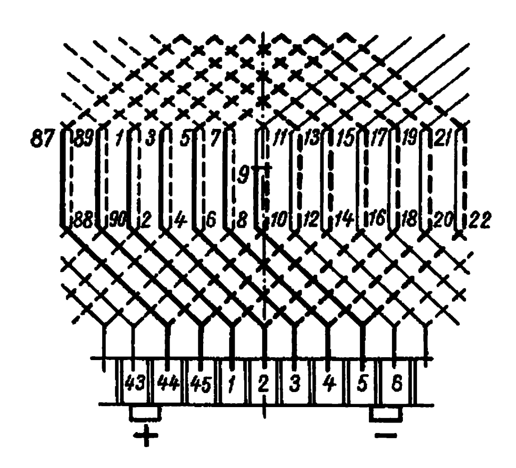


Рис. П8-3. Замыкание в пазовой части двух секций петлевой обмотки, находящихся в двух различных слоях

при петлевой обмотке вызывает замыкание секции, присоединенной к этим двум пластинам; замыкание же между двумя смежными пластинами при волновой обмотке вызывает замыкание секций, заключенных в одном полном обходе вокруг якоря. Число этих секций равно числу пар полюсов машины.

Замыкание между двумя секциями петлевой обмотки, лежащими в одном пазу в двух различных слоях обмотки, дает наибольшее число замыкаемых накоротко витков. В этом случае замыкаются накоротко все витки обмотки, находящиеся между двумя щетками различной полярности. Так, замыкание стержней *9* и *10* (рис. П8-3), лежащих в одном пазу (друг под другом), образует короткозамкнутую ветвь (показана жирными линиями), состоящую из стержней *87, 89, 1, 3, 5, 7, 12, 14, 16, 18, 20* и *22*. Замыкание осуществляется частями проводников *9* и *10* и соответствующими лобовыми частями.

Таким образом, замкнутой накоротко оказалась одна параллельная ветвь обмотки якоря. Если такое же замыкание произойдет в простой волновой обмотке, то замкнутой накоротко всегда окажется половина всей обмотки якоря (рис. П8-4); этот случай замыкания является самым тяжелым.

Если замыкание между слоями обмоток произойдет в лобовых частях, то и в этом случае образуются короткозамкнутые контуры. Подробное рассмотрение этого вида замыканий приводит к заключению, что чем ближе место замыкания к активной стали якоря, тем больше секций замыкается накоротко и тем под бóльшим напряжением они находятся. Таким образом,

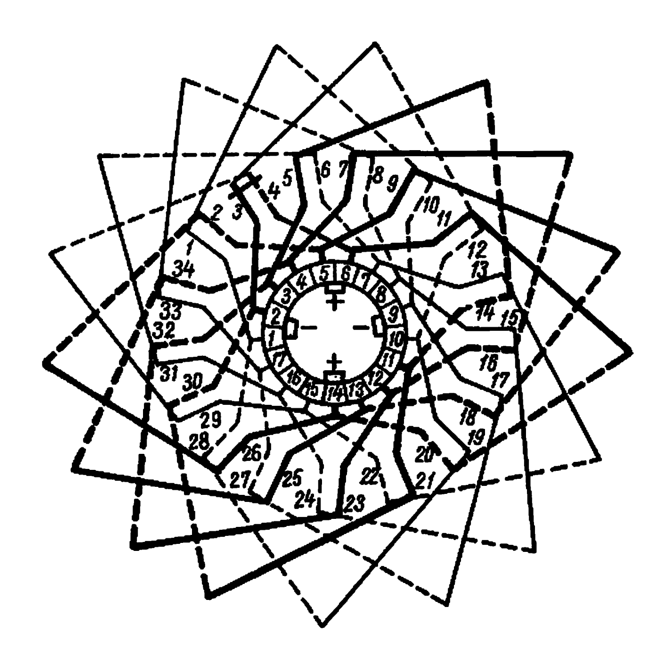


Рис. П8-4. Замыкание в пазовой части двух секций простой волновой обмотки, находящихся в двух различных слоях

вероятность пробоя между слоями обмотки вследствие плохой междуслойной изоляции возрастает по мере приближения к стали якоря.

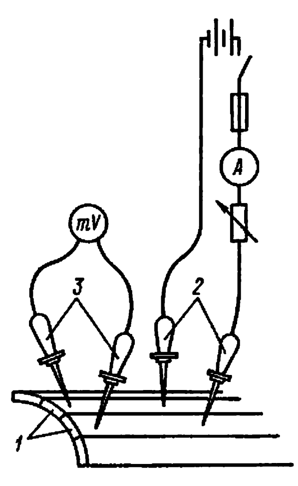
При коротком замыкании значительного числа секций положение короткозамкнутой ветви может быть обнаружено по местному нагреву лишь у многополюсных крупных машин с петлевой обмоткой. Обмотки же якорей мелких машин при значительной короткозамкнутой ветви быстро нагреваются целиком.

Определить по нагреву положение короткозамкнутой ветви якоря с волновой обмоткой при значительном числе замкнутых секций невозможно, та́к как в этом случае волновая обмотка нагревается целиком.

По местному нагреву обмотки представляется возможным найти лишь небольшие короткозамкнутые контуры.

Следует отметить, что нахождение больших короткозамкнутых контуров другими способами представляет большие трудности, особенно в обмотках с уравнительными соединениями. К тому же надобности в этом во многих случаях нет (обмотка имеет явные повреждения, требующие полной перемотки якоря). Поэтому для более простых и часто встречающихся случаев (на-

Рис. П8-5. Схема для нахождения замыканий между витками в обмотке якоря



пример, для нахождения замыканий витков одной секции, между соседними коллекторными пластинами или же между соседними секциями, находящимися в одном слое обмотки) в практике нашел большое применение метод падения напряжения, не требующий специального оборудования. Этот метод применяется как для петлевой, так и для волновой обмоток и особенно удобен при исследовании якоря с уравнительными соединениями. Он состоит в следующем.

К двум смежным коллекторным пластинам *1* (рис. П8-5) подводят постоянный ток при помощи пары щупов *2*, второй парой щупов *3* измеряют падение напряжения на этой же паре коллекторных пластин.

В случае петлевой обмотки при наличии замыкания в секции, присоединенной к исследуемой паре пластин, сопротивление ее будет меньше, и мы получим меньшее падение напряжения при одном и том же токе, чем на другой паре пластин, между которыми нет замыкания.

При простой волновой обмотке меньшее падение напряжения свидетельствует о наличии замыкания в секциях обхода обмотки, присоединенных к исследуемой паре пластин. Поэтому в подобных случаях для нахождения секции, имеющей дефект, измеряют падение напряжения между коллекторными пластинами дефектного обхода, отстоящими друг от друга на шаг по коллектору.

Если шаг по коллектору неизвестен, то он может быть определен по наименьшему сопротивлению между двумя коллекторными пластинами, находящимися примерно на расстоянии двойного полюсного деления.

Указанным выше способом исследуется весь якорь, и производится сравнение результатов измерения. Исследование необходимо выполнять при поднятых щетках. Следует отметить, что иногда при исследовании якорей с уравнительными соединениями могут получиться значительные отклонения в падениях напряжения между отдельными пластинами и при исправной обмотке якоря; в этом случае, однако, наблюдается закономерное изменение падений напряжения. Сравнение же показаний

производится по соответствующим парам пластин с одинаково изменяющимся падением напряжения.

В качестве источника тока удобно применять батарею аккумуляторов, но можно также пользоваться сетью 110 и 220 В постоянного тока. Для уменьшения силы тока последовательно с якорем включают реостат, позволяющий регулировать силу тока. Обычно достаточна сила тока 5—10 А. Для измерения падения напряжения следует пользоваться милливольтметром с подходящим пределом измерений. В случае необходимости значение падения напряжения можно отрегулировать изменением силы питающего тока посредством реостата.

Чтобы предупредить порчу милливольтметра, следует сначала прикладывать к коллектору щупы *2*; только обеспечив их надежный контакт с коллектором, можно прикладывать щупы *3*. Отнимать от коллектора следует сначала щупы *3*, а потом щупы *2*. Если приложить к пластинам щупы *3*, когда щупы *2* имеют плохой контакт, или же если начать шевелить щупы *2* при присоединенных к коллектору щупах *3*, то при изменениях тока может возникнуть значительная ЭДС самоиндукции, которая выведет милливольтметр из строя.

Рассмотренный метод нахождения замыканий между витками дает хороший результат при небольшом числе витков в секции (стержневые обмотки); в многовитковых проволочных секциях при замыкании 1—2 витков разница в показаниях милливольтметра на коллекторных пластинах исправной секции и поврежденной может оказаться незначительной.

2. Обрывы в обмотке якоря и плохой контакт в соединениях. Контроль качества паек. Обрыв в обмотке или плохой контакт сильно сказываются на коммутации машины и в зависимости от степени дефекта могут вызвать значительное искрение на коллекторе и подгорание коллекторных пластин. При длительной работе якоря с обрывом дуга, образующаяся в месте обрыва, может постепенно прожечь изоляцию, дать корпусное соединение и даже выжечь сталь якоря. При обрыве в петлевой обмотке возникает сильное искрение между коллекторными пластинами, к которым присоединена секция, имеющая обрыв.

Когда щетка перекрывает две коллекторные пластины, между которыми находится оборванная секция, то через обмотку якоря пойдет нормальный ток (рис. П8-6, *а*). Когда якорь переместится, произойдет разрыв тока в цепи якоря (рис. П8-6, *б*) и образуется сильная искра между щеткой и пластиной *1*, отчего поверхность этой пластины, а также пластины *2* сильно подгорает. Наибольшее подгорание будет у краев этих пластин, обращенных друг к другу. Точно так же подгорание будет наблюдаться у краев рабочей поверхности всех щеток машины, так

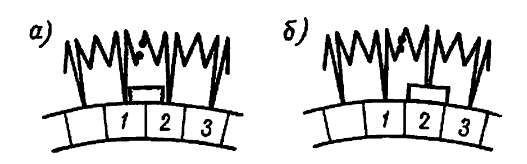


Рис. П8-6. Обрыв в секции обмотки якоря

как пластины, между которыми имеется обрыв, приходят в соприкосновение со всеми щетками.

Признаками плохого контакта могут служить только что описанные явления, выраженные в меньшей степени. Если при обрыве имеет место сильное искрение зеленого цвета, характеризующее выгорание меди, то при плохом контакте сильное искрение может не наблюдаться, а пластины, связанные с секциями, имеющими плохой контакт, подгорают.

Как при обрыве, так и при плохом контакте при наличии уравнительных соединений могут подгореть, кроме пластин, относящихся к дефектным секциям, и коллекторные пластины, отстоящие от дефектных на двойное полюсное деление и связанные с ними уравнительными соединениями.

При обрыве в простой волновой обмотке подгорает несколько пар коллекторных пластин, расположенных друг от друга на расстоянии шага по коллектору; число пар подгоревших пластин будет равно числу пар полюсов машины. Так, например, при обрыве в шестиполюсной машине в месте, указанном на рис. П8-7, помимо пластин *а* и *б*, подгорают попарно также пластины *в*, *г* и *д*, *е*.

Для определения места обрыва в обмотке можно пользоваться тем же способом, каким определяют витковые замыкания в якоре (см. рис. П8-5). При наличии обрыва или плохого контакта падение напряжения будет больше между пластинами, к которым присоединена дефектная секция.

Если исследуется якорь с петлевой обмоткой, то при наличии обрыва прибор покажет наибольшее отклонение лишь на одной паре пластин; при волновой обмотке наибольшее отклонение будет и на нескольких парах пластин, находящихся попарно на расстоянии коллекторного шага друг от друга.

Для нахождения обрыва в волновой обмотке исследование можно вести на протяжении половины шага по коллектору, а не по всему коллектору; этим будет определено наличие обрывов или плохих контактов в обходах обмотки. Найдя обходы, имеющие обрыв, можно путем измерения напряжений на коллекторных пластинах секций этих обходов определить те секции, которые имеют обрыв или плохой контакт.

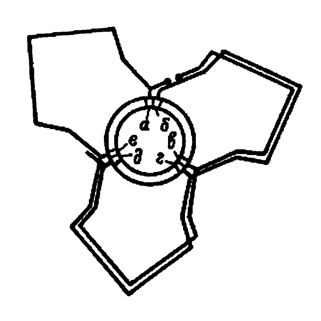


Рис. П8-7. Обрыв в простой волновой шестиполюсной обмотке якоря

Чтобы не сжечь прибор, следует к якорю подводить незначительное напряжение. В случае плохого контакта секций с коллектором отклонение, показываемое милливольтметром, между пластинами, где имеется дефект, будет повышено, так как плохой контакт имеет большее сопротивление, что и вызывает также большее падение напряжения.

В некоторых случаях секции с плохим контактом, а равно место плохого контакта в секции можно определить, если шевелить секцию вблизи паек и одновременно наблюдать за отклонением показаний прибора.

Методом падения напряжения можно определить наличие обрывов или плохих контактов в уравнительных соединениях. Для этого производят измерение падения напряжения попарно между коллекторными пластинами, расстояние между которыми равно шагу уравнительных соединений (шаг уравнительных соединений $y_{ур}=K/p$, где K — число пластин коллектора; p — число пар полюсов). При наличии дефектов в уравнительных соединениях признаки будут такими же, как и при дефектах в самой обмотке.

Методом падения напряжения широко пользуются для определения качества паек обмоток. При хорошей пайке показания милливольтметра между всеми коллекторными пластинами приблизительно одинаковы. Пайки можно считать хорошими, если разница сопротивлений между отдельными пластинами коллектора не превышает 10 % для небольших машин и 5 % для особо ответственных крупных машин. Увеличенное сопротивление (или падение напряжения при неизменном значении тока) между некоторыми смежными коллекторными пластинами указывает на плохую пайку; необходимо все места паек, относящиеся к этим пластинам, тщательно перепаять.

3. Замыкание обмотки якоря или коллектора на корпус. Во время нормальной работы машины замыкание обмотки якоря на корпус не обнаруживается, если только нет заземления у одного из проводов сети. При наличии такого заземления (если корпус машины не изолирован от земли) замыкание обмотки на корпус образует замкнутую цепь. При отсутствии заземления одного из проводов сети замкнутая цепь может образовываться только при замыкании обмотки на корпус в двух местах.

Определить наличие замыкания обмотки на корпус можно мегомметром или контрольной электрической лампочкой. В последнем случае один конец от лампочки присоединяют к сети, а другой — к коллектору, вал же якоря соединяют со вторым проводом сети. Наличие соединения обмотки с корпусом определяется по загоранию лампочки. При этом способе загорание лампочки возможно лишь при хорошем контакте в месте соединения.

Найти место замыкания обмотки на корпус можно также способом питания обмотки якоря постоянным током от постороннего источника тока (рис. П8-8). Подбор всех элементов схемы такой же, как и при определении замыканий в обмотке (см. рис. П8-5).

Присоединение источника тока к коллектору производится при петлевой обмотке в двух диаметрально противоположных точках, при волновой — к пластинам, находящимся на расстоянии половины коллекторного шага. Один проводник от милливольтметра присоединяют к валу якоря, а концом другого поочередно касаются всех коллекторных пластин. Если исследованию подвергается якорь с петлевой обмоткой, то по мере приближения пластины, присоединяемой к прибору, к пластине, соединенной с корпусом, показания прибора уменьшаются. При соприкосновении конца проводника от прибора с пластиной коллектора, соединенной с корпусом, показание в случае металлического контакта будет равно нулю. Показание будет очень малым при не совсем хорошем контакте, а также когда замыкание на корпус имеет не коллекторная пластина, а секция, присоединенная к этой пластине.

При соединении последующих пластин с прибором показания его меняют знак и возрастают по мере удаления присоединяемой к прибору пластины от пластины, соедииенной с корпусом.

При волновой обмотке изменение показаний милливольтметра по мере перемещения присоединяемой к нему пластины происходит периодически, соответственно перемещению на половину шага по коллектору; меньшие показания будут наблюдаться на пластинах обхода, секции которого (или же сами пластины) замкнуты на корпус. Наименьшие показания будут давать пластины, замкнутые на корпус непосредственно или через секции обмотки.

Так как при исследовании всего якоря наибольшее возможное напряжение, действующее на прибор, может оказаться равным напряжению, подводимому к якорю, то это надо иметь в виду при выборе прибора. Уменьшения отклонения стрелки прибора можно достигнуть регулировкой силы тока.

Чтобы найти замыкание на корпус в волновой обмотке, нет

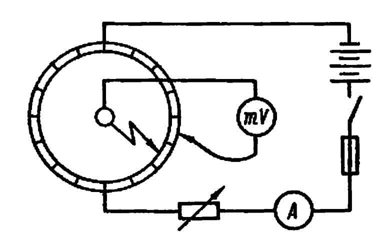


Рис. П8-8. Схема для нахождения места соединения обмотки якоря с корпусом

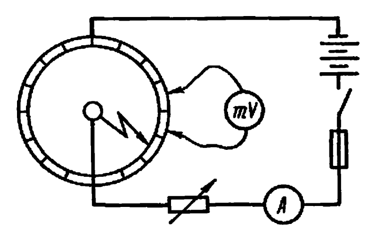


Рис. П8-9. Видоизмененная схема для нахождения места соединения обмотки якоря с корпусом

необходимости исследовать весь коллектор, можно исследовать пластины на протяжении половины шага по коллектору. Определив наличие замыкания на корпус в обходе обмотки, можно найти его и в отдельных секциях. При делении обходов обмотки на секции путем распайки необходимо каждую секцию и соединенные с ней коллекторные пластины проверить на соединение с корпусом.

Так как якорь питается по двум параллельным ветвям, то при наличии только одного замыкания на корпус при исследовании всего коллектора мы получим при петлевой обмотке еще одно нулевое или минимальное показание при соединении милливольтметра с пластиной, симметричной пластине с «корпусным» замыканием относительно точек питания якоря. Это объясняется тем, что указанные две точки будут иметь одинаковый потенциал (подобно диагонали уравновешенного измерительного моста).

Аналогичное явление будет наблюдаться и при волновой обмотке, но только здесь будет иметь место группа меньших показаний на пластинах обхода, симметричного обходу, имеющему соединение с корпусом.

Чтобы вторую точку с нулевым или минимальным показанием прибора не принять за второе замыкание на корпус, следует изменять точки питания якоря. Если при этом одна из точек с нулевым или минимальным показанием не совпадает с прежней точкой, то это укажет на наличие одного лишь замыкания на корпус.

Указанный способ нахождения места замыкания на корпус можно видоизменить (рис. П8-9). Один провод от аккумуляторной батареи присоединяют к любой коллекторной пластине, а второй — к валу якоря; затем при петлевой обмотке касаются поочередно каждой пары смежных коллекторных пластин концами проводников от милливольтметра. Показание прибора на

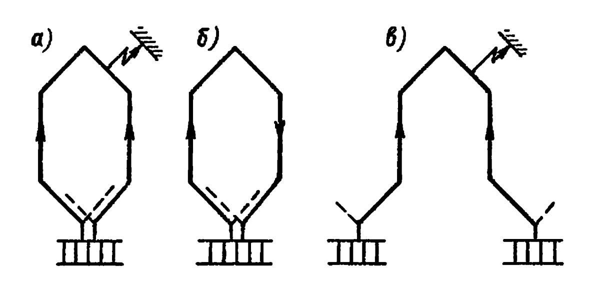


Рис. П8-10. Пояснение к нахождению места соединения обмотки якоря с корпусом

той паре пластин, между которыми имеется замыкание на корпус, резко меняется. Это объясняется изменением направления тока на обратное в одной части секции, как показано на рис. П8-10, *а*; направление тока в этой же секции при отсутствии замыкания на корпус показано на рис. П8-10, *б*.

При волновой обмотке поочередно касаются двух коллекторных пластин, находящихся точно на расстоянии шага по коллектору. Признаки наличия замыкания на корпус те же (рис. П8-10, *в*).

Оба способа дают удовлетворительные результаты при хорошем металлическим контакте с корпусом. При плохом контакте, например при весьма низком сопротивлении изоляции, эти способы не дают удовлетворительных результатов, и в этом случае применяют метод «прожигания».

Коллектор обвязывают несколькими витками голой проволоки. Нормальное напряжение через предохранитель и реостат прикладывают к проволоке и к валу якоря. Прохождение электрического тока через плохой контакт вызывает обгорание этого места, дугу и появление дыма. По этим признакам и обнаруживают дефект.

Иногда место замыкания на корпус можно найти, если шевелить по очереди секции у подозрительных мест (мест выхода обмотки из пазов) и одновременно измерять сопротивление изоляции мегомметром. Шевеление секции создает изменение контакта, а следовательно, и изменение сопротивления. Вместо мегомметра можно пользоваться контрольной лампочкой, включая ее между коллектором и валом якоря. Дефект обнаруживают по миганию лампы при шевелении секции.

В сложных случаях, когда вышеуказанные способы не дают результатов, приходится путем распайки обмотки делить ее на части. Разделив обмотку на две части, проверяют мегомметром каждую часть в отдельности. Обнаружив замыкание на корпус

в одной из половин, концы другой оставляют нетронутыми, а дефектную половину снова разделяют на две части. Так поступают до тех пор, пока точно не определится секция, имеющая замыкание на корпус.

4. Способы устранения повреждений в обмотке якоря. В зависимости от характера повреждений применяются те или иные способы их устранения. Так, например, обрыв или плохой контакт в обмотке (в петушках и хомутиках) и коллекторе может быть устранен перепайкой обмотки в указанных местах. Если же обрыв произошел в самом проводнике, то стержень или секцию нужно заменить новыми. Если обрыв имеется в лобовой части обмотки, то в некоторых случаях возможно устранение дефекта без замены секции. В мягких обмотках из круглого провода устранение обрыва внутри секции затруднительно, и здесь необходима частичная перемотка якоря.

Наиболее часто замыкание на корпус бывает в местах выхода секций из пазов. Этот дефект можно устранить установкой под секцией небольших клиньев из изоляционного материала (текстолит, сухой бук) или проложив покрытые лаком подкладки из электрокартона, слюды и т. д. Замыкание на корпус в пазовой части секции лучше всего ликвидировать переизолировкой всей секции или же заменой ее новой. Замыкание на корпус, вызванное отсырением, устраняют просушкой. Если имеется замыкание на корпус в нескольких секциях и, кроме того, изоляция других секций слаба, то приходится перематывать всю обмотку якоря. В случае соединения коллектора с корпусом необходимы его разборка и ремонт.

Замыкание в обмотке якоря между несмежными секциями и вообще замыкания большого числа секций встречаются реже замыканий внутри самой секции или же между концами секций на коллекторе. Поэтому, прежде чем приступить к устранению замыканий, необходимо тщательно осмотреть коллектор и убедиться в отсутствии соединений между его пластинами.

В случае короткого замыкания в секции ее необходимо заменить новой или всю переизолировать, так как при этом дефекте вся изоляция секции обычно приходит в негодность. Переизолировкой лишь места замыкания можно ограничиться только в случае неполного контакта в месте замыкания, да и то при отсутствии иных повреждений изоляции. Более или менее длительная работа машины при больших короткозамкнутых ветвях может привести в негодность всю обмотку, что потребует полной ее перемотки.

Ниже приводятся способы выключения поврежденных секций. Эти способы устранения дефектов могут применяться лишь в качестве временной меры в случае крайней необходимости

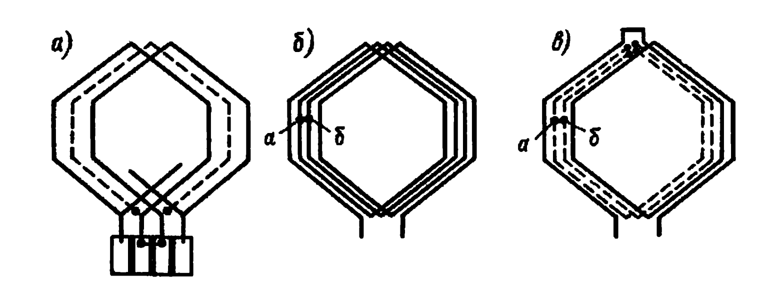


Рис. П8-11. Выключение секций петлевой обмотки

и когда число коллекторных пластин не слишком мало. Во многих случаях выключение одной секции не отражается заметным образом на коммутации машины.

На рис. П8-11, *а* показан способ выключения секции петлевой обмотки, имеющей соединение с корпусом или обрыв. Концы поврежденной секции отпаивают от коллектора, а две коллекторные пластины, к которым они были подключены, соединяют между собой путем пропайки или же перемычкой, надежно припаиваемой к коллекторным пластинам. Концы выключенной секции изолируют. Если в секции имеется соединение между витками, то, кроме сказанного, необходимо еще разрезать секцию, чтобы в ней не могли циркулировать токи, образующиеся в короткозамкнутой ветви при работе машины. Если в секции замкнуто небольшое число витков, то из нее можно выключить лишь короткозамкнутые витки. Для этого короткозамкнутые витки в лобовой части со стороны, противоположной коллектору, разрезают и изолируют, а витки, оставшиеся целыми, припаивают друг к другу. На рис. П8-11, *б* показан подобный случай, когда при наличии четырех витков в секции замыкание имеется между двумя рядом лежащими витками в точках *а* и *б*. На рис. П8-11, *в* короткозамкнутая ветвь показана сплошной линией, а штриховыми линиями показана выключенная и разрезанная часть секции. Из секции, помимо короткозамкнутого витка, выключают еще один виток, чтобы в оставшейся части секции не было частей короткозамкнутой ветви.

При замыкании на корпус или обрыве в секции волновой обмотки такие выключения также возможны, но здесь нужно выключить весь обход обмотки. Так, при повреждении в одной секции (см. штриховую линию на рис. П8-12) замыкают накоротко смежные пластины *а* и *б* этого обхода. Кроме того, из коллекторных пластин *а*, *б*, *г* и *ж* выпаивают концы, а оставшиеся свободными коллекторные пластины *г* и *ж* соединяют перемычками со смежными пластинами *в* и *е*. Такое соединение

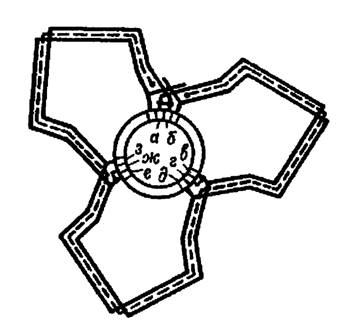


Рис. П8-12. Выключение секций волновой обмотки

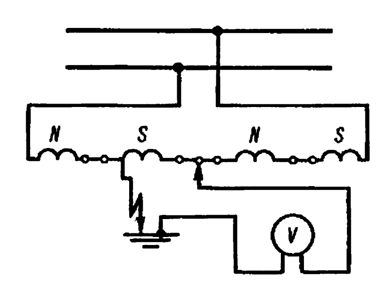
свободных пластин со смежными служит для улучшения коммутации. Короткозамкнутый контур должен быть разрезан, и образующиеся концы изолированы.

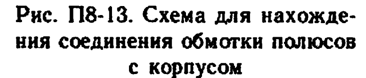
Выключение целого обхода обмотки не является обязательным, можно выключить лишь дефектную секцию. Так, при наличии дефекта в секции, подключенной к коллекторным пластинам *б* и *г* (рис. П8-12), концы этой секции выпаивают из пластин, а пластины *б* и *г* соединяют между собой прочно закрепленным проводником. При волновой обмотке можно выключать и части витков секции, что делается так же, как и при петлевой обмотке.

5. Повреждения в обмотке полюсов. В обмотках полюсов чаще всего повреждаются переходы, выводные концы катушек и места прохода выводных концов через корпус. К наиболее распространенным дефектам следует отнести замыкание обмоток на корпус, обрыв или плохой контакт в обмотках, соединение между витками.

Чтобы найти катушку, замкнутую на корпус, всю обмотку отъединяют от якоря и через нее пропускают постоянный ток, причем в параллельную обмотку можно подать нормальное для нее напряжение. Затем один проводник, идущий от вольтметра, присоединяют к корпусу, а вторым (свободным) проводником касаются соединительных перемычек между полюсами (рис. П8-13). Наименьшее показание прибора будет с обеих сторон катушки, замкнутой на корпус. При исследовании последовательной обмотки или обмотки добавочных полюсов нужно пользоваться милливольтметром, включая в цепь реостат для уменьшения силы тока. Катушки, замкнутые на корпус, можно обнаружить также, разъединяя их и поочередно испытывая контрольной лампой или мегомметром.

Обрыв в обмотках полюсов бывает лишь в катушках, изготовленных из проволоки небольшого сечения, т. е. в катушках параллельного возбуждения. В катушках последовательного возбуждения и в обмотке добавочных полюсов этот дефект почти не встречается. Плохой контакт встречается во всех видах обмоток. Наиболее часто обрыв или плохой контакт бывают в выводах катушек, в соединительных перемычках между полюсами и в кабельных наконечниках.




Рис. П8-13. Схема для нахождения соединения обмотки полюсов с корпусом

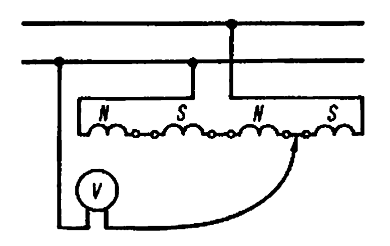


Рис. П8-14. Схема для нахождения обрыва в обмотке полюсов

Для нахождения обрыва или плохого контакта в катушке параллельной обмотки к ней подводят нормальное напряжение и вольтметром касаются поочередно выводных концов каждой катушки. При наличии обрыва вольтметр, подключенный к зажимам поврежденной катушки, покажет полное напряжение сети. На остальных же катушках прибор не даст отклонения показаний.

При плохом контакте напряжение на зажимах поврежденной катушки будет больше напряжения на зажимах других катушек.

Этот способ может быть несколько видоизменен. Обмотку также включают на нормальное напряжение, причем один проводник, идущий от вольтметра, подключают к одному из проводов сети, а вторым касаются поочередно выводных концов всех катушек (рис. П8-14); стрелка прибора не будет отклоняться до тех пор, пока не будет обнаружена катушка с обрывом. Катушка с обрывом может быть найдена и поочередным питанием всех катушек. При отсутствии обрыва в катушке будет протекать ток, что может быть замечено по амперметру, включенному в цепь.

Наконец, обрыв можно обнаружить мегомметром или контрольной лампой, не разъединяя катушек и испытывая соединение между собой двух выводных концов каждой катушки при отсоединенных выводных концах обмотки.

Короткое замыкание незначительного числа витков обмотки параллельного возбуждения может весьма мало сказаться на работе машины, особенно при волновой обмотке или петлевой с уравнительными соединениями.

При наличии короткого замыкания в параллельной обмотке наблюдается неравномерный нагрев катушек, причем менее нагретой оказывается дефектная катушка. Это объясняется тем,

что при выключении части витков и одинаковом токе во всех катушках (предполагается последовательное их включение) в дефектной катушке выделяется меньше тепла, а в короткозамкнутых витках, находящихся в постоянном магнитном поле, не индуктируются ЭДС, как это могло бы иметь место при переменном магнитном поле. Увеличение нагрева исправных катушек обусловливается также тем, что сила тока в обмотке возбуждения в связи с уменьшением ее сопротивления увеличивается. Дефектная катушка может быть найдена также измерением сопротивления измерительным мостом или же измерением падения напряжения у работающей машины.

Эти два способа дают хорошие результаты лишь при относительно большом числе короткозамкнутых витков, так как сопротивления исправных катушек могут отличаться друг от друга на несколько процентов.

Надежные результаты дает нахождение замыкания в витках при питании параллельной обмотки переменным током. При этом способе даже небольшое число короткозамкнутых витков дает себя знать немедленно, так как при этом резко меняется полное сопротивление дефектной катушки, а следовательно, и напряжение на ее зажимах (см. также разд. Б, п. 5).

Так как полное сопротивление катушки переменному току значительно превосходит сопротивление постоянному току, то для получения достаточно определенных результатов к обмотке возбуждения подводят более высокое напряжение переменного тока или же питают поочередно часть катушек. При питании дефектной катушки переменным током наблюдается не только уменьшение падения напряжения на ее зажимах, но и сильное разогревание короткозамкнутых витков, охватывающих переменный магнитный поток.

Во всех случаях испытания обмоток переменным током следует подводить к ним такое напряжение, чтобы сила переменного тока в испытуемых катушках не превосходила номинальной силы постоянного тока. Для этого последовательно с испытуемой катушкой в нужных случаях включают реостат. Кроме того, чтобы предупредить повреждение обмотки током чрезмерной силы, следует включить в цепь также и предохранитель.

При испытаниях переменным током следует иметь в виду, что на якоре и оставшихся неприсоединенными полюсах может оказаться высокое напряжение, и поэтому необходимы соответствующие предосторожности.

Испытание переменным током дает определенные результаты лишь при отсутствии у катушек металлических каркасов, действующих размагничивающим образом подобно вторичной

короткозамкнутой обмотке трансформатора. Кроме того, должны быть изолированы щетки от коллектора, так как в противном случае размагничивающее действие могут оказывать секции обмотки якоря, замкнутые накоротко щетками.

Замыкание в витках последовательной обмотки или обмотки добавочных полюсов определяется при питании их постоянным током через реостат либо при нормальной работе. Напряжения измеряют милливольтметром. Судить о наличии дефекта по различному нагреву этих катушек затруднительно. Короткое замыкание в обмотке добавочных полюсов характеризуется отсутствием искрения при холостом ходе и усиливающимся искрением на щетках одного из бракетов по мере возрастания нагрузки.

Способы устранения дефектов в обмотках полюсов зависят от характера повреждения. Обрыв, а также плохой контакт в наружных, доступных для ремонта местах устраняют пропайкой. Чтобы найти замыкание на корпус, дефектную катушку снимают с сердечника полюса и осматривают места соприкосновения ее как с полюсом, так и со станиной.

Замыкания в обмотках полюсов, если они находятся не на выводных концах, устраняют частичной или полной перемоткой. С катушки отматывают витки и одновременно производят осмотр. Если обнаруживается, что изоляция катушек, за исключением мест соединения с корпусом или замыкания между витками, не повреждена и находится в удовлетворительном состоянии, то можно ограничиться лишь изолированием поврежденных мест. В противном случае необходима полная перемотка катушки.

Если повреждения в обмотках полюсов вызваны отсыреванием изоляции, то они могут быть устранены просушкой катушек.

Б. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ОБМОТКАХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Короткие замыкания в обмотках переменного тока (в статорных обмотках и роторных обмотках асинхронных двигателей). Возможны следующие замыкания: между витками одной катушки, между катушками или катушечными группами одной фазы, между катушками разных фаз.

Основным признаком, по которому можно найти замыкание в обмотках переменного тока, является нагрев короткозамкнутого контура. Для этого необходимо ощупать обмотку после ее отключения. Ощупывание обмотки следует производить только при выключенной обмотке. Чтобы найти дефект в фазном роторе асинхронного двигателя, ротор затормаживают и включают статор в сеть. В случае замыкания значительной части обмотки

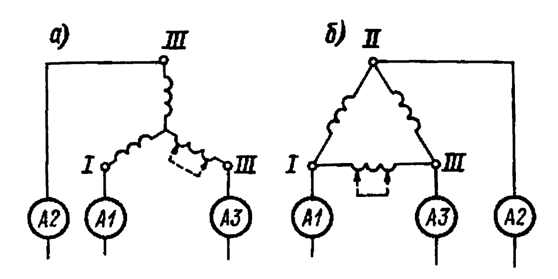


Рис. П8-15. Пояснение признаков замыкания в обмотках при соединении звездой (*а*) и треугольником (*б*)

ротора или если двигатель имеет большую мощность, затормаживание при номинальном напряжении становится невозможным, так как вызывает большую силу тока в статоре и срабатывание защиты двигателя. В таких случаях испытание рекомендуется производить при пониженном напряжении.

В некоторых случаях короткозамкнутую часть обмотки можно сразу определить по внешнему виду — по обуглившейся изоляции.

Следует иметь в виду, что при наличии параллельных ветвей в обмотке короткое замыкание в одной из ветвей фазы (при значительном числе замкнувшихся витков) может вызвать нагрев и другой ветви, не имеющей короткого замыкания, так как последняя оказывается замкнутой витками дефектной ветви обмотки (нахождение повреждения в подобных случаях см. ниже). Фазу, имеющую замыкание, можно найти по несимметрии потребляемого тока из сети. При соединении обмотки звездой (рис. П8-15, *а*) в фазе, имеющей замыкание, ток (*А3*) будет больше, чем в двух других фазах. При соединении обмотки треугольником (рис. П8-15, *б*) в двух фазах сети, к которым присоединена дефектная фаза, токи (*А1* и *А3*) будут больше, чем в третьей фазе (*А2*). Опыт определения дефектной фазы рекомендуется производить при пониженном напряжении ($^1/_3$ — $^1/_4$ номинального); в случае асинхронного двигателя с фазным ротором обмотка последнего может быть разомкнута, а в случае асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором или же в случае синхронного двигателя ротор может вращаться или быть заторможенным. При проведении опыта с синхронным двигателем в неподвижном состоянии его обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко или же на разрядное сопротивление.

В опыте с неподвижной синхронной машиной токи в ее фазах будут различаться даже в том случае, если машина исправна, что объясняется магнитной асимметрией ее ротора. При

поворачивании ротора эти токи будут изменяться, однако при исправной обмотке пределы их изменений будут одинаковы.

Фаза, имеющая замыкание, может быть определена и по значению ее сопротивления постоянному току, измеренного мостом либо по методу амперметра — вольтметра; меньшее сопротивление будет иметь фаза с замыканием. Если же нет возможности разъединить фазы, то производят измерения трех междуфазных сопротивлений. В случае соединения фаз звездой (рис. П8-15, *а*) наибольшим будет междуфазное сопротивление, измеренное на концах фаз, не имеющих замыканий; два других сопротивления будут равны между собой и будут меньше первого. В случае соединения фаз треугольником (рис. П8-15, *б*) наименьшее сопротивление будет на концах фазы, имеющей замыкание; два других измерения дадут бóльшие значения сопротивления, причем оба они будут одинаковы.

Катушечные группы или катушки, имеющие замыкания, могут быть найдены при питании переменным током всей обмотки или только дефектной фазы по нагреву или по значению падения напряжения на их концах. Катушечные группы или катушки, имеющие замыкание, будут сильно нагреты и иметь меньшее падение напряжения (при измерении напряжения удобно пользоваться острыми щупами, которыми прокалывают изоляцию соединительных проводов). В этом случае, так же как и выше, дефектные катушки можно найти по значению сопротивления постоянному току.

Замыкания в обмотке генератора могут быть найдены по значению индуктированной ЭДС в фазах обмотки, в ее катушечных группах или в катушках. Для этого генератор пускают в ход, дают ему небольшое возбуждение и производят измерения фазных напряжений; если обмотки соединены треугольником, то фазы следует разъединить. Фаза, имеющая замыкание, будет иметь меньшее напряжение. Для нахождения катушечной группы или катушки, имеющей замыкание, измеряют напряжение на их концах. Для высоковольтной машины опыт можно произвести при остаточном напряжении.

В тех случаях, когда необходимо выяснить, имеется ли дефект в статорной или роторной обмотке, поступают следующим образом.

Статорную обмотку включают на пониженное напряжение ($^1/_3$—$^1/_4$ номинального) при разомкнутом роторе и измеряют напряжение на кольцах ротора, медленно проворачивая ротор. Если напряжения на кольцах ротора (попарно) не равны между собой и меняются в зависимости от положения ротора по отношению к статору, то это указывает на замыкание в статорной обмотке. При замыкании в роторной обмотке (при исправной

статорной) напряжение между кольцами ротора будет неодинаковым и не будет меняться в зависимости от положения ротора. Опыт может быть произведен при питании ротора и измерении напряжения на зажимах статора, при этом получится обратная картина. Подводимое к ротору напряжение должно составлять $^1/_3$—$^1/_4$ номинального напряжения на кольцах ротора, т. е. напряжения на кольцах при неподвижном роторе и статоре, включенном на номинальное напряжение.

После того как установлено, какая из обмоток (роторная или статорная) имеет соединение между витками, определяют дефектную фазу, катушечную группу или катушку рассмотренными выше способами.

В сложных случаях (при замыкании большого числа катушек) или когда короткозамкнутую ветвь по каким-либо причинам не удается выявить, прибегают к методу деления обмотки на части. Для этого обмотку делят сначала пополам и проверяют мегомметром соединение между собой этих частей. Затем одну из этих частей делят снова на две части и каждую из них проверяют на соединение с первой половиной и так далее до тех пор, пока не будут найдены катушки, имеющие соединение.

Для наглядности на рис. П8-16 схематически представлен этот способ нахождения дефекта в фазе, имеющей восемь катушечных групп, при наличии соединения между катушками *2* и *6* катушечных групп. Деление обмотки на части показано в последовательном порядке.

Способ последовательного деления на равные части позволяет обойтись меньшим числом распаек, чем при делении всей обмотки на катушечные группы.

Если замыкание произошло между двумя фазами, то место соединения находят аналогично предыдущему, разъединяя обмотки пофазно. Катушки одной из фаз, имеющей соединение, разделяют на две части и мегомметром проверяют наличие соединений каждой такой половины со второй фазой. Затем ту часть, которая соединена с другой фазой, снова разделяют на две части и каждую из них снова проверяют и т. д.

Метод последовательного деления на части применяют при нахождении замыкания в обмотках, имеющих параллельные ветви. В этом случае необходимо дефектные фазы разделить на параллельные ветви и определить сначала, между какими ветвями имеется соединение, а уж затем применить к ним этот метод.

Так как замыкания между фазами или катушечными группами чаще бывают в лобовых частях обмотки или соединительных проводниках, то иногда удается сразу же найти место соединения путем приподымания и шевеления лобовых частей с одновременной проверкой мегомметром.

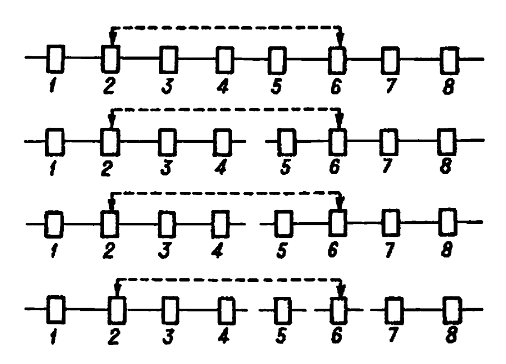


Рис. П8-16. Нахождение короткого замыкания между катушками одной фазы

2. Обрывы и плохой контакт в обмотках переменного тока. Прежде чем приступить к отысканию обрывов или плохого контакта в обмотке, необходимо убедиться в отсутствии этих дефектов вне обмотки. Так, признаки обрыва или плохого контакта в статорных обмотках могут быть следствием перегорания предохранителя, недостаточного прилегания контактов пусковой аппаратуры, неплотности контактов выводных концов и т. д. Эти дефекты могут оказаться и в контактном кольце асинхронного двигателя вследствие недостаточного контакта одной из щеток и т. д. После того как установлено, что дефект находится в самой обмотке, необходимо приступить к тщательному осмотру всех паек, особенно в хомутиках роторов.

Фаза, имеющая обрыв, может быть найдена мегомметром. Для этого в случае соединения обмотки звездой один проводник от мегомметра присоединяют к нейтрали, а вторым поочередно касаются концов всех фаз. В случае соединения треугольником необходимо разъединить обмотку в одной точке и испытать каждую фазу в отдельности.

При недоступной нейтрали обмотки, соединенной звездой, фазу, имеющую обрыв, можно найти по показаниям амперметров или при помощи мегомметра. Для этого касаются двумя проводниками от мегомметра попарно всех выводов обмотки. В случае соединения фаз треугольником найти фазу, имеющую обрыв, при помощи мегомметра без разъединения обмотки не представляется возможным. В этом случае фазу, имеющую обрыв, можно найти, измеряя омическое сопротивление обмотки между выводами. При измерениях между точками *А* и *В* (рис. П8-17), а также между точками *А* и *С* получим одинаковые значения сопротивлений, в то время как между

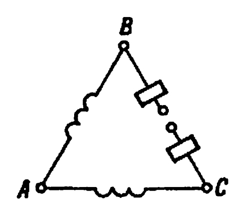


Рис. П8-17. Пояснение к нахождению обрыва в обмотке, соединенной треугольником

точками *В* и *С* (концами фазы, имеющей обрыв) сопротивление будет равно сумме сопротивлений двух других фаз.

Для генератора с обмотками, соединенными звездой, обрыв в какой-либо фазе можно определить по отсутствию в ней напряжения. Если обмотки соединены треугольником, то в случае обрыва в одной фазе междуфазные напряжения при холостом ходе остаются одинаковыми, и поэтому для нахождения поврежденной фазы необходимо либо разъединить обмотки и измерить напряжение на зажимах каждой фазы, либо определить дефектную фазу, измеряя сопротивления (рис. П8-17).

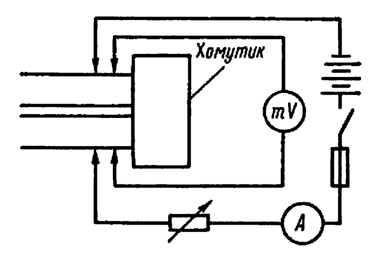
Чтобы найти катушечную группу или катушку, имеющую обрыв, одним проводником мегомметра касаются одного конца фазы, а другим — поочередно всех соединительных проводов между катушечными группами и катушками; при миновании частей обмоток с обрывом мегомметр дает большие показания (соответственно сопротивлению изоляции испытуемой обмотки). При этом испытании удобно пользоваться острыми щупами во избежание зачистки соединительных проводов. Количество зачисток или проколов изоляции можно уменьшить. Для этого надо одним проводником от мегомметра коснуться сначала середины обмотки фазы, а вторым — поочередно концов фазы и этим определить половину, имеющую обрыв, а затем коснуться средней точки дефектной половины и так далее, пока не будет найдена катушка с обрывом.

Наиболее вероятные места обрывов в проволочных обмотках находятся в междукатушечных соединениях, а в стержневых обмотках — в пайках (хомутиках). В короткозамкнутых обмотках роторов асинхронных двигателей и пусковых обмотках синхронных двигателей обрывы или плохой контакт часто бывают из-за плохой приварки или пайки в местах соединения стержней с замыкающими кольцами. Обрывы или плохой контакт в пусковых обмотках часто являются следствием окисления контактных поверхностей замыкающих колец, части которых соединены между собой болтами.

Обрывы в короткозамкнутых обмотках могут иметь место в пазовых частях в результате механических повреждений. В роторах асинхронных двигателей с алюминиевой литой обмоткой обрывы в пазовой части могут быть из-за дефектов при литье.

Для того чтобы убедиться в наличии обрыва или плохого

Рис. П8-18. Схема для обнаружения плохого контакта в хомутиках роторной обмотки асинхронного двигателя



контакта в короткозамкнутых обмотках, производят следующий опыт. Ротор затормаживают и в статор подают напряжение, равное $^1/_4$—$^1/_5$ номинального. Затем ротор медленно проворачивают и измеряют силу тока в статоре (в одной или трех фазах). При исправном роторе сила тока в статоре во всех положениях ротора будет одинаковой, а при обрыве или плохом контакте будет изменяться в зависимости от положения ротора.

Места обрывов или плохого контакта в наружных частях короткозамкнутых обмоток асинхронных двигателей и демпферных (пусковых) обмоток синхронных машин могут быть найдены тщательным наружным осмотром.

В пазовой части стержня можно найти обрыв следующим способом.

Ротор несколько выдвигают из статора и надежно предохраняют от проворачивания: в обмотку статора подают пониженное напряжение ($^1/_4$—$^1/_5$ номинального). На каждый паз выступающей части ротора поочередно накладывают тонкую стальную пластинку, перекрывающую два зубца ротора. При нахождении пластинки над пазами, в которых нет стержней с обрывом, она будет притягиваться и дребезжать; как только пластинка перекроет паз с поврежденным стержнем, притяжение и дребезжание станут значительно слабее или вовсе исчезнут.

Во избежание перегрева обмоток опыт следует производить достаточно быстро. Плохой контакт в обмотке можно обнаружить по методу падения напряжения при питании обмотки постоянным током. Схема для обнаружения плохого контакта в хомутиках ротора асинхронного двигателя показана на рис. П8-18; она аналогична приведенной выше (см. рис. П8-5). В поврежденном хомутике падение напряжения будет больше, чем в исправных хомутиках с хорошей пайкой.

3. Замыкание обмоток переменного тока на корпус. Фазу обмотки, замкнутую на корпус, можно определить мегомметром после разъединения (при наличии шести выводных концов у статорных обмоток) или распайки фаз.

Точное определение места замыкания облегчается «прожиганием». Применительно к машине низкого напряжения операция состоит в том, что один конец фазы присоединяют к полюсу сети, а второй — к корпусу через предохранитель 30—

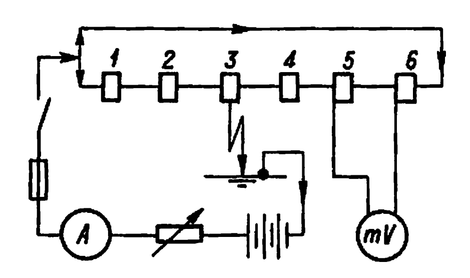


Рис. П8-19. Схема для нахождения соединения обмотки переменного тока с корпусом

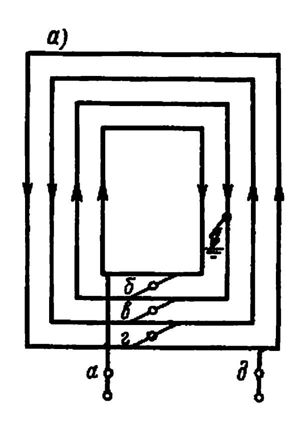
40 А. Прохождение тока через место замыкания на корпус вызовет появление дыма. Напряжение надо постепенно повышать до полного пробоя. На машине высокого напряжения «прожигание» можно произвести либо приложением низкого напряжения, либо от специальной испытательной установки.

Место замыкания обмотки на корпус можно найти также методом деления ее на части либо методом питания постоянным током.

Деление на части состоит в том, что мегомметром определяют фазу, имеющую замыкание на корпус, делят ее пополам распайкой междукатушечных соединений, а затем опять мегомметром определяют часть обмотки, имеющую соединение с корпусом. Подобное деление продолжают до тех пор, пока не будет найдена дефектная катушечная группа или катушка. Одновременно с проверкой мегомметром рекомендуется шевелить катушки. Изменение отклонений стрелки мегомметра укажет на наличие корпусного замыкания в перемещаемой части катушки.

Схема метода питания постоянным током (рис. П8-19) заключается в том, что оба конца фазы, имеющей замыкание на корпус, соединяют между собой и к ним присоединяют один из зажимов сети постоянного тока или батареи аккумуляторов. Другой зажим источника тока присоединяют к корпусу машины. Чтобы можно было ограничивать и регулировать силу тока, в цепь включают реостат. Источник постоянного тока не должен быть заземлен, а если один полюс его все же заземлен, то его следует присоединить к корпусу машины.

При замыкании обмотки на корпус направления токов в двух частях обмотки, разграниченных точкой замыкания, будут противоположны. Если поочередно касаться двумя проводами, присоединенными к милливольтметру, концов каждой катушечной группы, то стрелка прибора будет все время отклоняться в одном направлении до тех пор, пока концы от прибора не



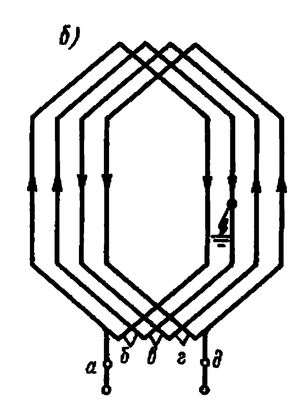


Рис. П8-20. Замыкание на корпус одной из катушек группы при простой катушечной (*а*) и при двухслойной (*б*) обмотке

минуют концов катушечной группы, замкнутой на корпус. В последнем случае отклонение стрелки изменится на обратное. На концах дефектной катушечной группы направление отклонения стрелки прибора будет зависеть от того, к какому концу ближе находится место замыкания на корпус. Кроме того, значение падения напряжения на концах катушечной группы, замкнутой на корпус, будет меньше, чем у других катушек, если замыкание на корпус не находится вблизи концов этой катушечной группы. Для нахождения дефектной катушки поступают аналогично предыдущему.

На рис. П8-20 показаны случаи замыкания на корпус одной из катушек группы. Оставив неизменной схему питания постоянным током, измеряют последовательно падения напряжения попарно между точками *а—б, б—в, в—г, г—д* и наблюдают за направлением отклонения стрелки прибора. Отклонение стрелки прибора в точках *а—б* будет противоположно отклонениям в точках *в—г* и *г—д*, в точках же *б—в* направление отклонения будет зависеть от места нахождения корпусного замыкания, а падение напряжения будет меньше, чем на зажимах других катушек. Чтобы измерить падение напряжения, можно либо зачистить соединительные проводники, либо воспользоваться острыми щупами, прокалывающими изоляцию.

Место замыкания на корпус можно определить и при помощи магнитной стрелки, если перемещать ее вдоль каждого паза; как только стрелка пройдет мимо места замыкания на корпус, она изменит направление отклонения на обратное. Это испытание требует разборки машины. Кроме того, чтобы полу-

чить хороший результат, необходим металлический контакт в месте замыкания на корпус. Этого достигают «прожиганием».

4. Способы устранения повреждений в обмотках переменного тока. При устранении повреждений в обмотках переменного тока руководствуются теми же соображениями, что и в случае устранения повреждений в якорях машин постоянного тока.

В экстренных случаях в качестве временной меры здесь также допускается выключение поврежденной катушки из схемы. Выключенную катушку необходимо надежно изолировать (а в случае замыкания между витками — разрезать) или совершенно удалить из пазов. Освободившиеся пазы следует заполнить деревянными клиньями. Число выключенных витков не должно превышать 10 % общего числа витков одной фазы. Такое выключение возможно только при последовательном соединении всех катушек одной фазы и соединении фаз звездой. При параллельном соединении катушек или соединении фаз треугольником выключение катушек одной фазы недопустимо, так как вследствие несимметричности параллельных ветвей или фаз в обмотке возникнут большие уравнительные токи. В этом случае нужно выключить соответствующее число катушек и в других фазах или параллельных группах. При этом желательно выключать катушки, сдвинутые относительно поврежденных на kZ/p пазов в других параллельных группах и $kZ/(3p)$ пазов в других фазах, где k — целые числа.

Для генератора выключение катушек в одной фазе возможно только тогда, когда генератор не работает параллельно с другими генераторами.

5. Повреждения в обмотках возбуждения. Для нахождения повреждений в обмотках возбуждения машин переменного тока применяются те же способы, что и для нахождения повреждений в обмотках полюсов машин постоянного тока.

Для нахождения междувитковых замыканий в обмотках роторов явнополюсных машин по методу питания переменным током (см. разд. А, п. 5) применяют напряжение 120—500 В в зависимости от числа полюсов. При отсутствии надлежащего напряжения следует разделить катушки на группы.

При использовании этого метода для роторов турбогенераторов необходимо снять бандажи (каппы), приложить к обмотке ротора напряжение 110—120 В от источника переменного тока и при помощи заостренных стальных щупов (игл), которыми прокалывают изоляцию, измерить напряжение на отдельных катушках. Эти измерения необходимы и в тех случаях, когда некоторые дефектные места обнаружены осмотром, так как в обмотке могут быть и скрытые места повреждений.

Для определения соотношений между напряжениями на

Таблица П8-1

Общее подведенное напряжение, В	Сила тока, А	Номер катушки						Число закороченных витков в катушке № 6
		1	2	3	4	5	6	
		Напряжение, В						
726	22,35	123	121	124	120	122	122	0
722	23,65	123	127	130	127	122	99	1
725	24,9	125	132	134	133	125	60	3
725	25,9	127,9	141	140	140	128,5	51	7
725	26,5	130	141	140	140	128	47	10

катушке с короткозамкнутыми витками и на исправных катушках был проведен соответствующий опыт [32].

На полюсной катушке № 6 шестиполюсного синхронного генератора были закорочены от одного до десяти витков при общем числе 118 витков на катушку и измерены напряжения на отдельных катушках (табл. П8-1).

Из этого опыта видно, что закорачивание только одного витка из 118 витков на катушке, т. е. менее 1 % общего числа всех витков, можно легко обнаружить при помощи переменного тока по резкой разнице напряжений на отдельных катушках. При испытании постоянным током междувитковое соединение, охватывающее такое незначительное число витков, обнаружить было бы невозможно. Из-за размагничивающего действия тока, индуктируемого в короткозамкнутых витках катушки № 6, напряжение на соседних катушках № 1 и 5 также понижается в сравнении с более отдаленными катушками № 2, 3 и 4.

При этом испытании ротор следует вывести из статора, так как в собранной машине в статоре могут индуктироваться опасные высокие напряжения.

Вместо того чтобы испытывать ротор, выведенный из статора, можно кратковременно подключить статор со вставленным ротором при разомкнутой цепи возбуждения к сети переменного тока пониженного напряжения, которое не должно превышать 15—20 % номинального. У многополюсных машин сила тока в статоре при этом обычно не превышает 25—50 % номинального тока.

Так как поле статора наводит ЭДС в обмотке ротора, то если в последней имеются короткозамкнутые витки, в них создается большой ток и дефектное место может быть обнаружено по сильному нагреванию. Можно также определить место междувиткового замыкания измерением напряжения на отдельных катушках: на дефектных катушках напряжение будет значитель-

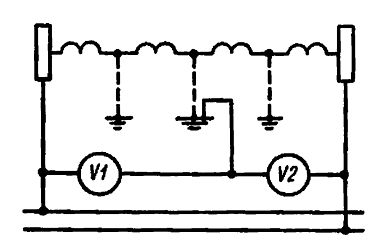


Рис. П8-21. Схема для нахождения неустойчивого междувиткового замыкания в обмотке ротора синхронной машины

но меньше, чем на исправных. При таком испытании в роторе могут возникнуть высокие напряжения, поэтому прикосновение к обмотке или контактным кольцам ротора опасно для жизни.

Описанный способ определения места междувиткового соединения дает вполне надежные результаты при наличии устойчивого соединения в катушках (как во время вращения ротора, так и после его остановки). Значительно труднее определить место междувиткового соединения, если оно неустойчиво и появляется только при вращении ротора от действия центробежных сил. В таких случаях, если наружным осмотром не удается обнаружить «больное место», необходимо насадить на вал вспомогательное контактное кольцо и поставить вспомогательную щетку для снятия напряжения с отдельных катушек. Вместо вспомогательного кольца можно использовать также и вал. От всех междукатушечных соединений отводят контрольные провода, которые поочередно присоединяют к вспомогательному кольцу (или валу), причем первым присоединяют провод, идущий от середины обмотки возбуждения (рис. П8-21). Остальные контрольные провода изолируют и надежно укрепляют на валу, чтобы при вращении ротора они не могли оторваться. После этого в ротор через контактные кольца дают переменный ток от источника с напряжением 120—150 В (для генератора с явно выраженными полюсами) и при помощи двух вольтметров *V1* и *V2* (рис. П8-21) измеряют напряжение между каждым контактным кольцом и валом (или вспомогательным кольцом). При отсутствии междувиткового соединения у неподвижного ротора оба напряжения должны быть равны. При разворачивании ротора в момент образования междувиткового соединения показания вольтметров становятся различными, причем напряжение на той половине обмотки, в которой находится поврежденная катушка, будет меньше напряжения на исправной половине обмотки.

Измерение можно производить также и одним вольтметром, измеряя поочередно напряжение между каждым из контактных колец и валом (или вспомогательным кольцом). В момент образования междувиткового соединения получается толчкообразное изменение показаний вольтметра, причем в исправной части

обмотки напряжение увеличивается, а в неисправной части уменьшается. Само собой разумеется, что для этих измерений нужно применять вольтметр с достаточной чувствительностью.

В дальнейшем, после определения части обмотки, в которой находится дефектная катушка, поочередно присоединяют к контактному кольцу (или валу) контрольные провода от других катушек и посредством измерения напряжения точно определяют дефектную катушку.

Для этого необходимо установить на кольцах вспомогательные медносетчатые щетки.

Использование токоведущих щеток для измерений напряжения может резко снизить их точность, так как контактное переходное напряжение между кольцом и щеткой нестабильно.

Применение вышеуказанного метода для нахождения неустойчивого междувиткового соединения в обмотках роторов турбогенераторов связано с весьма большими трудностями, в частности может потребоваться неоднократное снятие и надевание бандажей, что неприемлемо.

Замыкание обмотки ротора на корпус, если оно является устойчивым, определяется следующим образом.

В обмотку через контактные кольца подают постоянный ток через регулировочное сопротивление такой величины, чтобы сила тока не превышала номинальной, и измеряют напряжение между обоими контактными кольцами и валом. Пропорционально значению измеренных напряжений отсчитывают число катушек или витков и приблизительно определяют место замыкания на корпус.

Если место замыкания на корпус таким способом точно определить не удается, то при помощи заостренных стальных игл измеряют напряжение между сталью и отдельными витками (осторожно, чтобы при прокалывании не повредить изоляцию). Замыкание находится в том витке, напряжение которого по отношению к стали равно нулю.

Применение последнего способа к обмотке ротора турбогенератора требует снятия одного роторного бандажа.

Так как нахождение места замыкания на корпус в обмотке ротора турбогенератора является сложной операцией, то необходимо прежде всего, до начала ремонта, проверить, нет ли заземления в цепи возбуждения за пределами обмотки ротора.

На щите управления обычно имеется специальная схема для определения в процессе эксплуатации (см. приложение 10, рис. П10-2) сопротивления изоляции цепи возбуждения при помощи вольтметра.

Внимательно наблюдая при переключениях за величиной и полярностью показаний вольтметра этой схемы, можно при

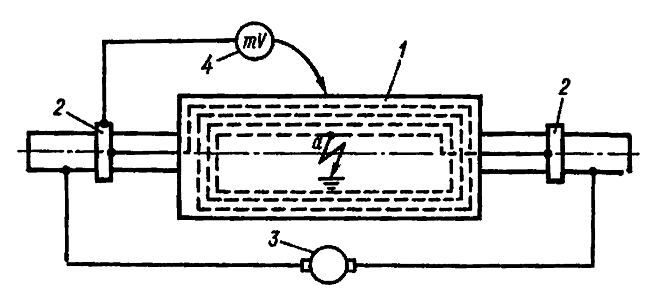


Рис. П8-22. Схема для нахождения замыкания на корпус обмотки ротора турбогенератора

низком сопротивлении изоляции определить, не только на каком полюсе, но и в какой части цепи возбуждения находится заземление.

Если близкое к нулю U_2 или U_3 имеет знак, одинаковый с U, то соединение обмотки ротора с валом находится вблизи соответствующего кольца; если же такое показание противоположно знаку U, то заземление в цепи возбуждения находится за пределами обмотки ротора. В этих случаях целесообразно вынуть все щетки из щеткодержателей и для окончательного заключения о местонахождении заземления при номинальной частоте вращения ротора измерить мегомметром сопротивление изоляции относительно земли сначала обмотки ротора, присоединяя один полюс мегомметра к контактному кольцу с помощью изолированной от траверсы медной щеточки, а затем остальной (неподвижной) части цепи возбуждения.

Результаты этих измерений укажут достоверно, на каком полюсе и в какой части цепи находится соединение с землей.

Если установлено, что заземление — в обмотке ротора, то для уточнения места замыкания рекомендуется следующий метод [19].

По валу ротора *1* (рис. П8-22) пропускают постоянный ток от низковольтного генератора *3*. Ток должен быть порядка 1000 А. Ток, протекающий по валу, создает падение напряжения вдоль него, а обмотка ротора, соприкасающаяся с телом ротора (в точке *a*), будет иметь потенциал по всей своей длине, равный потенциалу точки замыкания. Поэтому, если один конец от милливольтметра *4* присоединить к одному из контактных колец *2*, а другим концом от прибора, присоединенным к острию, касаться тела ротора, производя измерения по длине ротора, то можно найти точку, где показания прибора будут равны нулю. В сечении ротора, перпендикулярном его оси и проходящем через эту точку, и находится место замыкания на корпус. Таким

образом, и этот метод не дает возможности точно установить место замыкания, для этого приходится прибегнуть к методу деления обмотки на части, вскрывая ряд пазов.

Если замыкание на корпус является неустойчивым, т. е. проявляется только при вращении ротора, то используют измеренные напряжения между валом и контактными кольцами при номинальной частоте вращения ротора, на основании которых определяют приблизительно место замыкания на корпус, после чего наружным осмотром находят место замыкания. В роторах турбогенераторов поврежденное место следует искать в верхней части обмотки под пазовыми клиньями или под роторными бандажами, так как при вращении под действием центробежных сил обмотка сильно прижимается к этим частям, вследствие чего может иметь место продавливание изоляции. Другим местом, где следует искать повреждение, является выход обмотки из пазов.

Иногда при неподвижном роторе сопротивление изоляции меньше, чем при вращении; в этом случае место повреждения следует искать на дне пазов и на опорных поверхностях в лобовых частях обмотки.

Для того чтобы установить, что замыкание обмотки на корпус связано с ее перемещением при вращении ротора, рекомендуется снять кривую изменения сопротивления изоляции обмотки в зависимости от частоты вращения.

Во многих случаях наиболее радикальным способом определения места замыкания на корпус является метод «прожигания». Для этой цели к одному контактному кольцу и валу через цепь, состоящую из сопротивления, ограничивающего значение тока, амперметра, предохранителя или максимального выключателя, подводят постоянный или переменный ток, например от осветительной сети. Если напряжение последней окажется недостаточным, то необходимо приложить более высокое напряжение (500 В и больше). На место замыкания в этом случае указывает появление искры или дыма.

Если, несмотря на отсутствие искры или дыма, амперметр показывает прохождение тока, то не следует пропускать ток слишком долго. Это предотвратит чрезмерное обугливание изоляции или выгорание меди в месте замыкания.

Ротор перед «прожиганием» необходимо тщательно прочистить и продуть сжатым воздухом во избежание воспламенения грязи, осевшей на обмотке и на стали.

Для роторов турбогенераторов метод «прожигания» током следует применять с большой осторожностью, чтобы не допустить оплавления электрической дугой роторного бандажа.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

ПАРАЗИТНЫЕ ТОКИ В ВАЛУ И ПОДШИПНИКАХ

А. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ТОКОВ

Паразитные токи в подшипниках электрических машин могут быть вызваны различными причинами. С этим явлением приходится встречаться главным образом в крупных синхронных машинах, реже — в асинхронных двигателях и машинах постоянного тока.

Токи в подшипниках опасны тем, что образующиеся в масляном слое между шейками вала и вкладышами маленькие электрические дуги разъедают поверхности шеек и вкладышей, перенося баббит на шейки вала, что вызывает чрезмерный нагрев подшипников и даже расплавление заливки вкладышей. Кроме этого, электрическое действие тока портит масло, вызывая его почернение. Это также увеличивает нагревание подшипников.

Такие же повреждения шеек валов и вкладышей могут быть и от других причин, неэлектрического характера; к ним следует отнести недоброкачественность баббитовой заливки, наличие воды в масле, кислотность масла, ненормальные условия работы вкладышей и т. д. Поэтому для установления действительной причины повреждений приходится часто применять метод последовательного исключения отдельных причин.

Ниже приводятся основные причины появления паразитных токов в валу и подшипниках.

1. Несимметрия магнитного поля машин. Из-за несимметрии магнитного поля может иметь место при вращении ротора пульсирующий поток в замкнутом контуре, образованном валом ротора *1* (рис. П9-1), подшипниками *2*, фундаментной плитой *3* и масляными зазорами подшипников. Так как сопротивление

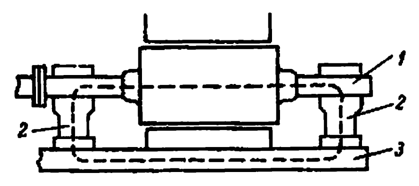


Рис. П9-1. Путь прохождения токов в подшипниках

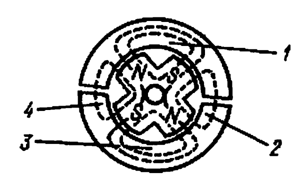


Рис. П9-2. Магнитные линии при наличии стыков в стали статора

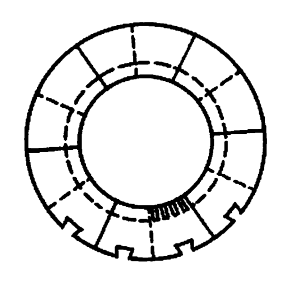


Рис. П9-3. Стыки в сегментах статорной стали

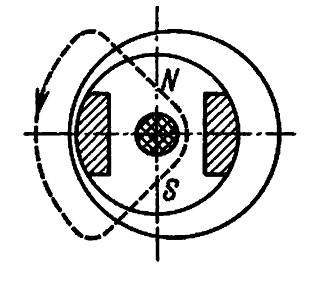


Рис. П9-4. Путь магнитных линий при неравномерном зазоре между ротором и статором

этой цепи незначительно, то возникающая даже небольшая ЭДС вызывает в ней циркуляцию значительных токов. Индуктированная ЭДС может достичь нескольких десятых долей вольта, а иногда нескольких вольт. Если электрическая машина соединена с другой машиной, то вызванный указанной ЭДС ток может повредить подшипники или другие части второй машины.

Асимметрия магнитного потока имеет место из-за чисто конструктивных недостатков или по причинам эксплуатационного характера. К конструктивным причинам относятся, например, наличие стыков в активной стали при разъемном статоре или наличие в последнем осевых вентиляционных каналов. При наличии стыков (рис. П9-2) число магнитных линий, замыкающихся через стыки (линии *2* и *4*), может оказаться меньшим, чем число магнитных линий, замыкающихся через другие части системы (линии *1* и *3*). Наличие стыков в сегментах статорной стали (рис. П9-3) может также служить причиной появления токов в подшипниках.

Причинами эксплуатационного характера являются, например, неравномерный зазор между ротором и статором или короткие замыкания в катушках полюсов, создающие магнитную асимметрию. При неравномерном зазоре (рис. П9-4) магнитные линии стремятся замкнуться по пути наименьшего сопротивления, охватывая вал ротора. При вращении ротора контур «вал — подшипники — плита» пронизывается переменным магнитным потоком и в нем индуктируется ЭДС.

2. Униполярная индукция. Токи в подшипниках могут возникнуть от продольного намагничивания вала синхронной машины при коротком замыкании части витков в одном из полюсов, вследствие чего часть магнитного потока замыкается через шей-

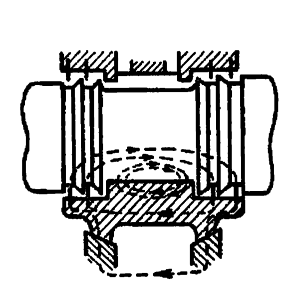
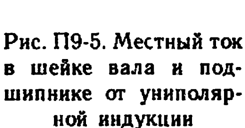



Рис. П9-5. Местный ток в шейке вала и подшипнике от униполярной индукции

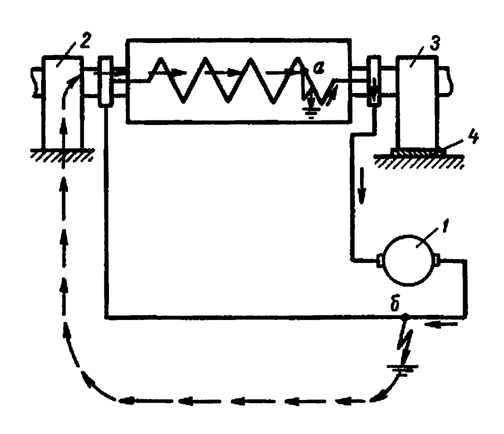


Рис. П9-6. Короткое замыкание в обмотке ротора турбогенератора вследствие одновременного замыкания обмотки на корпус и заземления цепи возбуждения

1 — возбудитель; *2* и *3* — подшипники турбогенератора; *4* — изоляция подшипника

ки вала, подшипники и фундаментную плиту. При вращении вала машины в результате униполярной индукции возникает местный постоянный ток, замыкающийся через шейку вала в подшипниках (рис. П9-5). Продольное намагничивание вала может произойти и от намагничивающего действия токоотводов, находящихся вблизи вала.

Мера, принимаемая обычно против подшипниковых токов,— изоляция подшипниковых стояков от фундаментной плиты — не препятствует протеканию местных токов от униполярной индукции.

Для устранения или уменьшения токов от униполярной индукции следует размагнитить вал (см. разд. Г) либо изменить расположение токоотводов.

3. Короткое замыкание в обмотке ротора (якоря) через подшипники. Это имеет место в случае замыкания обмотки ротора (якоря) на вал при одновременном заземлении во внешней цепи ротора. На рис. П9-6 показан такой случай для ротора турбогенератора. В результате замыкания обмотки ротора на его бочку в точке *а* и заземления цепи возбудителя *1* в точке *б* ток протекает через неизолированный подшипник *2* (путь тока показан стрелками).

В подобных случаях повреждение шеек вала и подшипнико-

вых вкладышей может быть весьма значительным, что потребует немедленного ремонта.

4. Электрический заряд роторов турбогенераторов от действия пара на ротор турбины. При зарядке ротора турбины паром на валу роторов агрегата появляется высокое напряжение. Значение его зависит от состояния масляной пленки, через которую заряд стекает в землю. Между валом и подшипниками иногда наблюдается проскакивание искры. Измерение сопротивления изоляции подшипника показывает полную ее исправность. Напряжение же между валом и корпусом машины, если измерить его магнитоэлектрическим вольтметром с большим внутренним сопротивлением (200 кОм и больше), оказывается больше напряжения между кольцами ротора. Пики напряжения по осциллограммам достигают 400 В и более. Результаты измерения сильно зависят от внутреннего сопротивления вольтметра, которым производится измерение. При измерении вольтметром с меньшим сопротивлением напряжение понижается, а при включении лампы накаливания между валом и корпусом генератора показания вольтметра падают до нуля; лампа при этом не загорается. Несмотря на значительные напряжения от электростатических зарядов, вызываемый ими ток обычно не представляет опасности вследствие незначительной мощности источника.

Чтобы обслуживающий персонал не испытывал неприятного ощущения при соприкосновении с валом агрегата, рекомендуется установить на валу со стороны турбины щеточку, заземляемую через сопротивление порядка 100 Ом.

Из всех рассмотренных паразитных токов наибольшую опасность представляют токи вследствие несимметрии магнитного поля машины.

Б. УСТРАНЕНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ТОКОВ

Одним из основных методов устранения паразитных подшипниковых токов, вызываемых пульсирующим магнитным потоком в контуре «вал — подшипники — фундаментная плита», является изоляция подшипниковых стояков от фундаментной плиты, чем прерывается цепь тока. Обычное размещение изолирующих подкладок под подшипниковыми стояками различных машин и агрегатов показано на рис. П9-7, где буквой *Т* обозначены машины переменного тока, а буквой *П* — машины постоянного тока; изолирующие подкладки показаны жирными линиями.

При соединении одной машины с первичным двигателем или с приводной машиной (рис. П9-7, *а*) изолируют передний подшипник (со стороны, противоположной приводу) независимо от

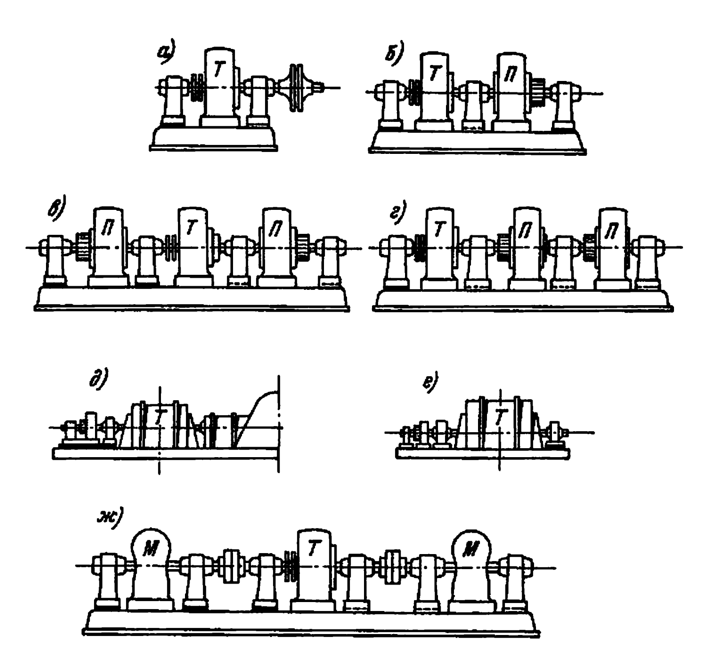


Рис. П9-7. Размещение изолирующих подкладок для предотвращения токов в подшипниках

того, установлены ли машины на одной общей фундаментной плите или на разных плитах. Изоляция стоек подшипников агрегатов, состоящих из нескольких машин, установленных на одной общей плите, в зависимости от их взаимного расположения показана на рис. П9-7, *б, в* и *г*. В синхронных машинах, соединенных непосредственно с другими машинами и имеющих возбудитель на общей фундаментной плите с основной машиной (причем возбудитель также непосредственно соединен с основной машиной), изолируют подшипник основной машины и подшипники возбудителя (рис. П9-7, *д*). В синхронных компенсаторах, работающих без соединения с другими машинами и находящихся на общей фундаментной плите с возбудителем, изолируют подшипник со стороны, противоположной возбудителю (рис. П9-7, *е*).

Изоляция подшипников двигателя переменного тока при установке его на общей фундаментной плите с двумя приводимымн им машинами *М* показана на рис. П9-7, *ж*. Для изоляцин подшипниковых стояков применяют гетинакс или текстолит толщиной 2—5 мм. Изоляцнонные подкладки должны вы-

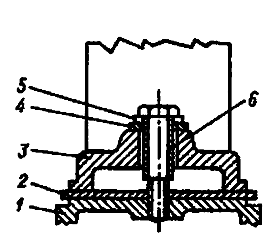


Рис. П9-8. Изоляция подшипникового стояка

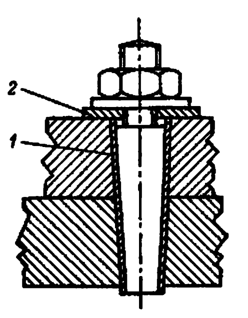


Рис. П9-9. Изоляция контрольного штифта

ступать за пределы стояков на 5—10 мм от краев по всему контуру.

Наряду с главной изоляцией (изоляционные подкладки между стояками и фундаментной плитой) осуществляют изоляцию еще и болтов, крепящих стояки к плите, и конических контрольных штифтов.

На рис. П9-8 показана главная изоляция и изоляция болтов подшипникового стояка. Между фундаментной плитой *1* и стояком *3* проложен лист гетинакса *2*, болт изолирован бакелитовой трубкой *6* толщиной 2 мм. Изолирующую шайбу *4* из гетинакса надевают на трубку *6*; внутренний диаметр шайбы должен равняться внешнему диаметру трубки; внешний диаметр изолирующей шайбы должен быть несколько больше диаметра металлической шайбы *5*; трубка *6* должна быть установлена заподлицо с металлической шайбой, причем трубка должна выступать за пределы стенки стояка.

Изоляция контрольного штифта (рис. П9-9) состоит из опрессованного на штифте электрокартона *1* и текстолитовой шайбы *2*. Так как штифты должны быть плотно пригнаны к их гнездам, то, кроме изолированных штифтов, поставляются штифты и без изоляции, под полный размер конического отверстия; этими штифтами производят временную заштифтовку, после чего вспомогательные штифты заменяют изолированными.

Для предотвращения протекания подшипниковых токов по другому пути (кроме прерванного изоляционными подкладками под подшипники) изолируют также маслопровод (рис. П9-10). Для этого между фланцами вставляют изолирующую кольцевую прокладку из гетинакса с некоторым припуском по диаметру. Изолированная часть трубы не должна иметь металлического

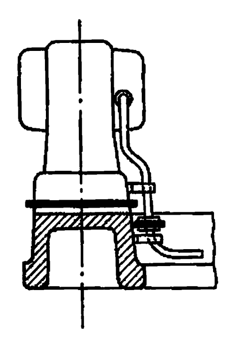


Рис. П9-10. Изоляция маслопровода подшипникового стояка

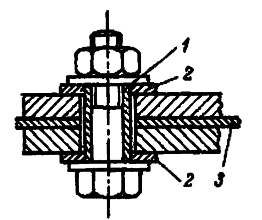


Рис. П9-11. Изоляция фланцев маслопровода

соединения с фундаментной плитой. На рис. П9-11 показана изоляция фланцев маслопровода; она состоит из бумажно-бакелитовых трубок *1* и гетинаксовых шайб *2*; между фланцами проложена кольцевая прокладка *3* также из гетинакса.

Существуют также конструкции фланцевых соединений маслопровода, не требующие изоляции болтов трубками и шайбами.

При водяном охлаждении подшипников трубопровод, подводящий воду к изолированному подшипниковому стояку, должен иметь вставку из резиновой трубки того же сечения, длиной не менее 100 мм. Часть трубопровода, присоединенная к стояку, также не должна иметь металлического соединения с фундаментной плитой.

В. ПРОВЕРКА ЦЕЛОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ПОДШИПНИКОВ

Состояние изоляции подшипников в процессе эксплуатации должно проверяться в установленные сроки.

Эту проверку нужно производить при неподвижной машине и при ее работе. Определение сопротивления изоляции на ходу машины производится при холостом ходе и при нагрузке путем измерения напряжений указанным ниже методом.

Для измерений применяется вольтметр со шкалой 3—10 В. При проверке турбогенератора вольтметр должен иметь по возможности малое внутреннее сопротивление, т. е. большое потребление. Это необходимо для «отстройки» от токов электрических зарядов ротора, в противном случае эти токи могут влиять на показания прибора. При отсутствии такого прибора можно пользоваться обычным прибором через трансформатор

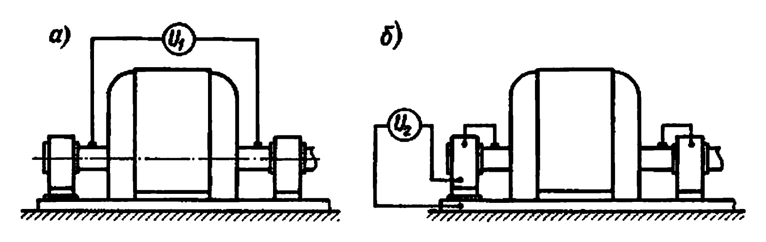


Рис. П9-12. Определение исправности изоляции подшипника

безопасности 220/12 В, включив вольтметр на обмотку 220 В. Производят два измерения. При первом измерении (рис. П9-12, *а*) провода от вольтметра присоединяют к двум медносетчатым щеткам, прикрепленным к изолированным рукояткам; щетки прикладывают к концам вала. При втором измерении (рис. П9-12, *б*) определяют напряжение между фундаментной плитой и корпусом подшипника при закороченных масляных пленках. Каждую из закороток одним концом присоединяют к подшипнику, а вторым — к медносетчатой щетке, накладываемой на вал. При исправной изоляции подшипника напряжения U_1 и U_2 должны быть одинаковыми. Если же изоляция под подшипником повреждена, то напряжение U_2 меньше U_1. При резком снижении сопротивления изоляции подшипников необходимо произвести тщательное обследование для устранения повреждения.

Напряжения на валу, измеренные при холостом ходе и при нагрузке, отличаются друг от друга.

При монтаже машины и капитальных ремонтах производят проверку сопротивления изоляции всех изолированных подшипников при полностью собранных маслопроводах. Для этого приподнимают краном конец вала со стороны, противоположной изолированному подшипнику, и между шейкой вала и вкладышем, а также между валом и тросом крана устанавливают изолирующие прокладки и измеряют сопротивление изоляции мегомметром при напряжении 1000 В.

Сопротивление изоляции должно быть не менее 1 МОм. Для измерения сопротивления изоляции можно было бы приподнять конец вала, опирающийся на изолированный подшипник, но при тяжелых роторах необходимо нагрузить этот подшипник, чтобы измерение производилось при нормальном давлении на изоляцию.

Наиболее частыми причинами нарушения изоляции подшипников являются наружное загрязнение краев изоляции (или мест стыка, если изоляция состоит из нескольких частей), шун-

тировка изоляционных прокладок броней кабеля возбудителя, трубопроводом, инструментом, случайно прикасающимся к подшипнику или к плите возбудителя, и прочим, загрязнение изоляции через установочные отверстия в корпусе подшипника или возбудителя, наличие забытого в гнезде неизолированного установочного штифта, нарушение изоляции между фланцами маслопровода, нарушение целости изолирующих шайб, прокладок или втулочек болтов и штифтов.

Особенно часты нарушения изоляции между фланцами маслопроводов. Имеют место случаи загрязнения прокладок и внутри маслопроводов. Учитывая указанные трудности проверки сопротивления изоляции подшипника, очень полезно трубопроводы, присоединяемые к изолированным подшипникам, как масляные, так и водяные, снабжать патрубками, изолированными с обеих сторон. Это позволяет в необходимых случаях быстро проверять состояние изоляции присоединенных трубопроводов в процессе работы агрегата.

Иногда с целью обеспечения возможности проверки изоляции подшипника при работе машины применяется между подшипником и фундаментной плитой составная изоляционная прокладка, разделенная металлическим листом. При этом предполагается, что измеренное высокое сопротивление этого листа относительно земли указывает на хорошую изоляцию относительно земли и подшипника.

Это предположение неверно, так как при хорошей изоляции металлического листа подшипник может быть заземлен, как указано выше, через болт крепления, штифт или какой-либо случайный металлический предмет. С другой стороны, заземление промежуточного металлического листа не свидетельствует о заземлении подшипника, так как может быть повреждена изоляция только с одной стороны листа. Таким образом, целесообразность применения составной изоляционной прокладки весьма сомнительна, так как проверка изоляции подшипника с помощью промежуточного листа может ввести в заблуждение обслуживающий персонал.

Необходимо иметь в виду, что положительные результаты проверки изоляции подшипника на отсутствие заземления даже рекомендуемыми выше методами не являются доказательством того, что при работе генератора отсутствуют местные подшипниковые токи или что через подшипник со стороны привода не протекает ток из-за двойного заземления в цепи возбуждения.

г. РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ВАЛА

Намагниченность вала в большинстве случаев не влияет на работу генератора, но иногда может быть причиной возникновения подшипниковых токов; кроме того, она создает неудобства при обслуживании, ревизии или ремонте генератора из-за магнитного притяжения инструмента.

Чтобы определить, намагничен ли вал, к его торцевой поверхности прикладывают кусок мягкой стали.

Размагничивание вала производят следующим образом.

1. Ротор вынимают из статора.

2. При помощи магнитной стрелки определяют полярность концов вала. При этом могут наблюдаться два случая:

а) оба конца вала имеют одинаковую полярность (рис. П9-13);

б) оба конца вала имеют различную полярность (рис. П9-14).

3. На каждый конец вала наматывают 10—15 витков хорошо изолированного провода сечением 6—16 мм^2. Направление

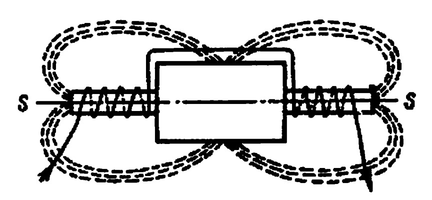


Рис. П9-13. Размагничивание вала при одинаковой полярности его концов

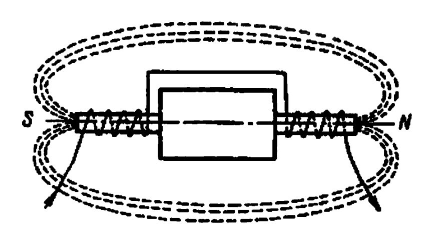


Рис. П9-14. Размагничивание вала при различной полярности его концов

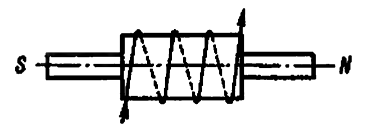


Рис. П9-15. Витки на бочке ротора турбогенератора для размагничивания вала

намотки этих витков должно быть согласованным с установленной полярностью вала: в случае «а» направление намотки на одном конце вала должно быть противоположно направлению намотки на другом (рис. П9-13); в случае «б» направление намотки одинаково на обоих концах вала; кроме того, у турбогенератора можно наматывать несколько витков на самую бочку ротора (рис. П9-15).

4. Через намотанную на валу обмотку пропускают постоянный ток. Так как невозможно заранее определить требуемую для размагничивания вала силу тока, то необходим источник постоянного тока, напряжение которого можно регулировать. Сила тока, требующаяся для размагничивания, колеблется от 10 до 50 А в зависимости от степени намагниченности вала. Размагничивание следует начинать с небольшой силы тока и затем постепенно ее увеличивать, пока магнитная стрелка не покажет изменения полярности концов вала.

Так как незначительная намагниченность вала безвредна, то ее можно не устранять.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

СУШКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические машины подлежат сушке после окончания монтажа или в том случае, если понизилось сопротивление изоляции их обмоток в результате длительного бездействия. В первом случае сушка обязательна и тогда, когда сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса, а также между изолированными друг от друга обмотками оказывается удовлетворительным. Объясняется это тем, что высокое сопротивление изоляции относительно корпуса еще не гарантирует такого же высокого сопротивления изоляции между витками.

Критерием сухости изоляции может служить наряду со значением сопротивления изоляции также отношение значений сопротивления изоляции при различной длительности приложения напряжения. Для этого измеряют сопротивление изоляции мегомметром спустя 15 и 60 с с момента приложения напряжения при одной и той же частоте вращения рукоятки и берут отношение показаний мегомметра:

$$r_{60}/r_{15}=K,$$

где K — коэффициент абсорбции.

Значение K всегда больше единицы и увеличивается по мере высыхания изоляции, при сухой изоляции может достичь 2—3. Значение этого коэффициента зависит от температуры обмотки. С увеличением температуры значение K для просушенной обмотки уменьшается. Необходимо учесть, что для получения правильных показаний мегомметра следует устранять остаточные заряды обмотки путем заземления на несколько минут перед каждым измерением.

В соответствии с рекомендациями электромашиностроительных заводов крупные электрические машины, имеющие стержневую обмотку статора с компаундированной изоляцией класса В и изоляцию классов В и F на термореактивных связующих, можно считать сухими и включать в работу без сушки при выполнении следующих условий:

а) если имеется полная уверенность в том, что при хранении, перевозке и монтаже машины не было попадания влаги на обмотки;

б) если при температуре 75 °С сопротивление изоляции обмотки не меньше определяемого по формуле (но не менее 0,5 МОм):

$$r=\frac{U_{ном}}{1000+P/100},$$

где r — сопротивление изоляции всей обмотки статора, МОм; $U_{ном}$ — номинальное напряжение обмотки, В; P — номинальная мощность машины, кВ·А;

в) если коэффициент абсорбции K не менее 1,3.

Сопротивление изоляции обмотки ротора турбогенератора при температуре 75 °С должно быть не менее 0,04 МОм.

Если температура обмотки отличается от 75 °С, то допускается пересчет сопротивления изоляции исходя из снижения сопротивления изоляции в два раза на каждые 20 °С повышения температуры.

Для проверки состояния изоляции при ремонте или ревизиях с учетом температуры следует результаты измерения сравнить с данными, полученными при вводе в эксплуатацию высушенной машины.

На рис. П10-1 показана в полулогарифмических координатах зависимость сопротивления высушенной обмотки статора (r_{60}) от температуры при остывании (прямая *1*). На этот же график можно нанести для горячего состояния допустимое сопротивление изоляции в соответствии с условием «б» (точка *с*).

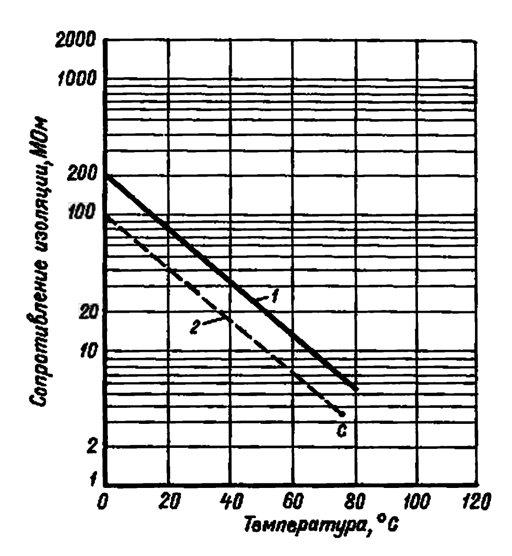


Рис. П10-1. Зависимость сопротивления изоляции от температуры при остывании машины

Примерная кривая допустимого минимального сопротивления изоляции в условиях эксплуатации при меньших температурах представляет собой прямую *2*, параллельную прямой *1* и проведенную через точку *c*.

В тех случаях, когда машина имеет лишь небольшое и к тому же поверхностное увлажнение, вызванное остановкой, допускается контрольная сушка и подсушка при пониженном напряжении или в режиме частичной нагрузки при достаточно холодной обмотке, но с соблюдением следующих условий:

а) при начальной температуре и в процессе подсушки машины сопротивление изоляции *r* и коэффициент абсорбции *K* должны быть не менее указанных выше в условиях «б» и «в»;

б) скорость подъема температуры обмотки не должна превышать 4 °С/ч;

в) по возможности производить контрольные измерения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции (желательно через 2 ч);

г) при подсушке под нагрузкой машина не должна находиться в оперативном распоряжении диспетчера до того момента, пока не будет обеспечена надлежащая сухость изоляции машины в соответствии с установленными выше условиями.

Низковольтные машины небольшой мощности могут быть пущены в эксплуатацию без подсушки, если сопротивление изо-

ляции от корпуса достаточно велико и если можно считать установленным, что машина при хранении ее или перевозке не могла отсыреть.

Цель сушки — удалить влагу из обмотки машины. Удаление влаги из изоляции обмотки происходит за счет так называемой термической диффузии, вызывающей перемещение влаги в направлении потока тепла, т. е. от более нагретой части к более холодной. Перемещение влаги происходит вследствие перепада влажности в разных слоях изоляции: из слоев с большей влажностью влага перемещается в слои с меньшей влажностью. Перепад влажности создается перепадом температуры.

Чем больше температурный перепад, тем интенсивнее происходит сушка. Поэтому, нагревая внутренние части обмотки (например, током), можно создать перепад температуры между внутренними и внешними слоями изоляции и тем ускорить процесс сушки. Температурный перепад можно создать также быстрым периодическим охлаждением наружных слоев изоляции путем периодического продувания холодного воздуха и последующего повторного нагревания. Подобными приемами можно пользоваться при сушке сильно увлажненных обмоток.

Сушка электрических машин может производиться различными методами: внешним нагреванием, нагреванием током от постороннего источника, током короткого замыкания, вентиляционными потерями, потерями в активной стали или корпусе машины и др. В тех случаях, когда одним каким-либо методом не удается получить необходимую температуру сушки или же когда нагрев отдельных частей получается неравномерным, применяют комбинированный метод сушки, представляющий собой сочетание двух каких-либо методов.

Выбор метода сушки зависит главным образом от местных условий, имеющихся возможностей и в некоторых случаях от степени увлажненности изоляции. Наиболее интенсивной сушкой сильно увлажненных обмоток является сушка током, при которой внутренние слои изоляции нагреваются сильнее наружных. Однако сушка током, пропускаемым по обмотке с сильно увлажненной изоляцией, может привести к вспучиванию последней, а сушка такой обмотки постоянным током может оказать и электролитическое действие. Поэтому в подобных случаях рекомендуется сушку производить другими методами, например потерями в активной стали, методом внешнего нагревания и т. д. После предварительной подсушки этими методами можно применить сушку током.

Перед сушкой надо очистить машинное помещение от пыли, грязи и мусора, машину осмотреть и продуть сжатым воздухом. Перед сушкой током необходимо проверить все контактные

части, а если эта сушка связана с вращением машины, то и зазоры между ротором (якорем) и статором (полюсами) и в подшипниках. Корпус машины следует заземлить. Во время сушки машину надо вентилировать — это ускоряет процесс сушки. Однако слишком сильная вентиляция препятствует нагреванию до необходимой температуры.

Чтобы избежать излишней потери тепла во время сушки, машину следует защищать снаружи от окружающего воздуха, но сохранить при этом вентиляцию, способствующую удалению влаги. Для этой цели машину открытого типа обшивают досками, покрывают брезентом и т. п. В наиболее высоком и наиболее низком местах обшивки (или брезента) делают вентиляционные отверстия, обеспечивающие непрерывность вентиляции. В машинах закрытого типа следует открыть смотровые люки (в станине, в щитах и т. п).

В процессе сушки температуру обмоток и стали измеряют термометрами, установленными в нескольких местах. В машинах с замкнутой или проточной вентиляцией термометры устанавливают также на входе и выходе воздуха. Если внутрь машины заложены температурные детекторы, то ими можно пользоваться вместо термометров.

Температуру обмоток можно определять также по методу сопротивления. Наивысшая температура во время сушки в наиболее горячем месте обмотки или стали не должна превышать: по термометру 80 °С, по методу сопротивления 100 °С, по температурному детектору 90 °С.

При сушке машин с проточной вентиляцией температура выходящего воздуха из машины не должна превышать 65 °С.

Настоящие рекомендации по предельным температурам можно скорее всего отнести к обмоткам статоров высоковольтных электрических машин с изоляцией класса А и невыпечной изоляцией класса В.

В отдельных случаях при необходимости сокращения времени сушки указанные температуры могут быть повышены на 10—15 °С. При современной технологии монтажа статорных обмоток с термообработкой изоляции лобовых частей и деталей крепления статорной обмотки температуру сушки (термообработки) доводят и до 120—130 °С.

Нагревать обмотку и сталь нужно постепенно — при быстром нагревании температура внутренних частей машины легко может достигнуть опасного значения, в то время как нагрев наружных частей будет еще незначительным. Кроме того, разница в постоянных времени нагрева и в коэффициентах линейного расширения обмотки и активной стали, а также и конструктивных частей машины может при быстром нагреве послужить

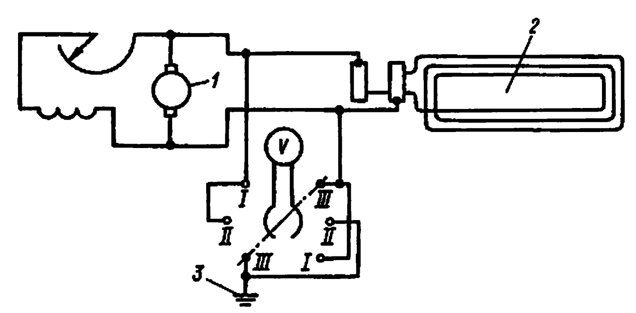


Рис. П10-2. Схема измерения сопротивления изоляции всей цепи возбуждения при помощи вольтметра без отключения источника питания
1 — возбудитель; 2 — ротор; 3 — заземление

причиной повреждений (разрывов) изоляции и механических повреждений станин, роторов и пр.

При сушке крупных машин, например турбогенераторов и прокатных двигателей, скорость нагрева должна быть такой, чтобы температура 50 °С (по термометру) обмотки и стали или температура выходящего воздуха 40 °С были достигнуты не ранее 20—30 ч с момента начала сушки, а наивысшая температура — не ранее чем через 40—50 ч.

При сушке током необходимая скорость подъема температуры достигается либо постепенным ступенчатым повышением тока, либо временным отключением его. Увеличивать ток надо лишь после того, как температура обмоток установилась.

Во время сушки необходимо также измерять сопротивление изоляции всех обмоток машины, а при сушке током — и значение тока. В процессе сушки ведут протокол и вычерчивают кривые зависимости сопротивления изоляции и температуры обмоток от времени сушки. Эти кривые облегчают суждение об успешности сушки (характерные кривые сушки см. на рис. П10-13). Измерения производятся в начале сушки через 20—30 мин, а при достижении установившейся температуры — через час. Измерения температуры и сопротивления изоляции продолжаются до полного охлаждения машины. Если машину сушат током, то на время измерения сопротивления изоляции ток необходимо выключать. В этом случае измерения сопротивления изоляции можно производить каждые два-три часа.

Если ротор синхронной машины в процессе сушки питается от своего возбудителя или другого источника, то сопротивление изоляции всей цепи возбуждения можно измерять, не выключая тока — при помощи вольтметра (рис. П10-2).

Сопротивление изоляции испытуемой обмотки определяют по формуле

$$r = r_в \left(\frac{U_1}{U_2 + U_3} - 1 \right),$$

где r — искомое сопротивление изоляции относительно земли; $r_в$ — сопротивление вольтметра; U_1 — показание вольтметра в положении *I*; U_2 — абсолютное значение показания вольтметра в положении *II*; U_3 — абсолютное значение показания вольтметра в положении *III*.

Внутреннее сопротивление вольтметра должно быть не менее 500 Ом на каждый вольт напряжения на кольцах ротора. При включении вольтметра последовательно с испытуемой обмоткой (положение *II*) вследствие разрядного тока может наблюдаться бросок стрелки вольтметра. Это временное отклонение не следует принимать во внимание, надо учитывать лишь установившееся показание вольтметра.

Если $U_2 + U_3 > U_1$, то это указывает на неточность измерения. Для большей точности измерений желательно, чтобы порядок значения сопротивления вольтметра $r_в$ не очень отличался от порядка значения измеряемого сопротивления изоляции.

Обычно в начале сушки сопротивление изоляции понижается по мере нагревания машины, после достижения минимума оно начинает возрастать и, наконец, становится постоянным или незначительно изменяется в сторону повышения.

При установившемся значении сопротивления изоляции и неизменном значении коэффициента K сушка крупных машин должна продолжаться 5—10 ч. В течение этого времени сопротивление изоляции не должно изменяться. Наименьшее сопротивление изоляции, при котором машина может быть включена в сеть, определяется в соответствии с ГОСТ 183—74, стандартами или техническими условиями на конкретные виды машин или, при отсутствии этих данных, составляет при температуре, близкой к рабочей, 1 МОм на 1 кВ номинального напряжения, но не ниже 0,5 МОм. Измерять сопротивление изоляции обмотки следует в нагретом состоянии. Удовлетворительный результат измерения, полученный после перерыва в сушке, при холодном состоянии обмотки, не дает основания считать сушку законченной.

Установившееся значение сопротивления изоляции, а также отношение r_{60}/r_{15} заносят в протокол. Общая продолжительность сушки крупных машин составляет примерно 3—4 суток и больше в зависимости от состояния изоляции, температуры и влажности окружающей среды.

Если после длительного нагревания машина не поддается сушке, то рекомендуется сушку временно прекратить и охладить лобовые части обмотки, вскрыв утепление обмотки. Проветрив машину в течение 30—60 мин, можно вновь приступить к сушке.

Такое охлаждение обмотки с последующей сушкой рекомендуется продолжать 2—3 раза с интервалами 5—10 ч. Благодаря внешнему глубокому охлаждению влага внутри обмотки будет переходить от более горячих внутренних участков к поверхности, что будет способствовать сушке. Этот метод применяется для сушки сильно увлажненных обмоток, причем для большей эффективности рекомендуется повышать температуру обмотки до 100—110 °С.

После окончания сушки машину следует остановить, удалить термометры, временно установленные измерительные приборы, осмотреть обмотку, контактные кольца (коллектор), щетки.

Б. СУШКА ВНЕШНИМ НАГРЕВАНИЕМ

Для нагревания этим методом можно использовать различные нагревательные устройства: блоки сопротивлений, лампы накаливания и пр. Источники нагревания следует для большей эффективности помещать внутри машины. Можно сушить обмотку машин и обдувом их горячим воздухом из воздуходувки (рис. П10-3).

При сушке внешним нагреванием необходимо избегать местных перегревов, связанных с близостью нагревателей. Такие перегревы можно предупредить с помощью перегородок, дающих потоку горячего воздуха нужное направление. Работая с воздуходувкой, надо следить за тем, чтобы искры от нагревателей не попали в машину. Поэтому нагреватели должны работать без чрезмерного накала. Рекомендуется установить проволочную сетку на патрубке воздуходувки, а самому патрубку придать такой изгиб, чтобы раскаленные частицы, находящиеся в воздухе, не попадали на обмотку машины. Важно также предотвратить попадание внутрь машины пыли, чего можно до-

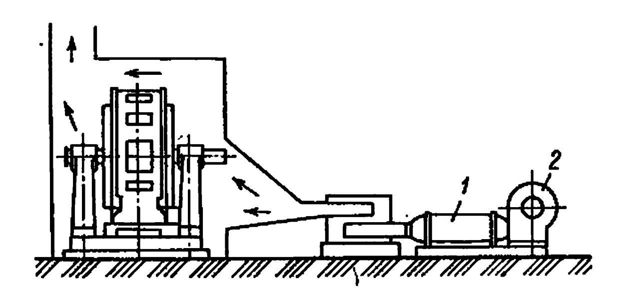


Рис. П10-3. Сушка машины горячим воздухом
1 — кожух нагревательных сопротивлений; 2 — вентилятор

стичь, установив матерчатый фильтр на всасывающем патрубке вентилятора.

Более низкая температура во внутренних слоях обмотки по сравнению с внешними ее слоями и отсутствие местных внутренних перегревов являются причиной того, что при сушке внешним нагреванием допускается более высокая температура нагрева обмотки, чем при других способах сушки. Все же эта температура, измеренная термометром, не должна превышать 90 °С.

Сушка внешним нагреванием может применяться в качестве самостоятельного метода, а также совместно с другими методами, рассматриваемыми ниже. Сушка крупных машин внешним нагреванием с помощью воздуходувки малоэффективна из-за трудности нагрева активной стали.

В. СУШКА ТОКОМ ОТ ПОСТОРОННИХ ИСТОЧНИКОВ

Этим методом можно сушить электрические машины всех типов. Он применяется главным образом тогда, когда не представляется возможным вращать машину и имеется источник низкого напряжения достаточной силы тока. Так как при этом методе сушки машина неподвижна, то это ухудшает условия охлаждения по сравнению с вращающейся машиной; поэтому необходимый для сушки ток обычно значительно меньше номинального и, например, для машин открытого типа составляет не более 50—70 % его.

При сушке отключать ток рубильником или автоматом не следует во избежание пробоя изоляции, выключение нужно производить, постепенно снижая подводимое напряжение.

1. Сушка машин постоянного тока. При сушке этим методом через последовательную цепь машины, состоящую из обмоток якоря, добавочных полюсов, последовательной и компенсационной обмоток, пропускают постоянный ток от источника низкого напряжения. Необходимое значение напряжения определяют по омическому сопротивлению всей цепи и требуемой силе тока. Якорь во время сушки периодически медленно поворачивают, чтобы все коллекторные пластины и катушки поочередно включались в цепь.

Параллельную обмотку возбуждения можно сушить отдельно, если она не высохнет в процессе сушки последовательных обмоток. При незначительном сдвиге щеток с нейтрали машина может пойти в ход и достичь опасной частоты вращения; поэтому необходимо постоянно наблюдать за ней и в случае надобности выключить ток постепенным снижением подводимого напряжения. Недостатком этого метода сушки является подгорание коллекторных пластин, связанное с неподвижностью якоря.

2. Сушка асинхронных двигателей. Для сушки асинхронного двигателя трехфазным током нужно надежно затормозить ротор, а к статору подвести от источника трехфазного тока напряжение не более 15—20 % номинального; обмотку ротора замыкают накоротко. При этом сила тока как в статоре, так и в замкнутом накоротко роторе достигает примерно номинальных значений. Если отсутствует необходимое напряжение для питания статора, то можно ток подводить к ротору, а статор замкнуть накоротко. При этом к ротору подводят напряжение не более 15—21 % номинального напряжения на кольцах. При слишком быстром повышении температуры следует снизить подводимое напряжение. Если же напряжение нельзя регулировать, то нужно периодически выключать ток.

Можно сушить током отдельно ротор и статор. Для этого ротор должен быть вынут из статора. Для получения номинального тока нужно подводить примерно такое же напряжение, как при питании статора с замкнутым накоротко ротором.

При сушке асинхронных двигателей методом короткого замыкания необходимо следить за нагреванием бандажей ротора.

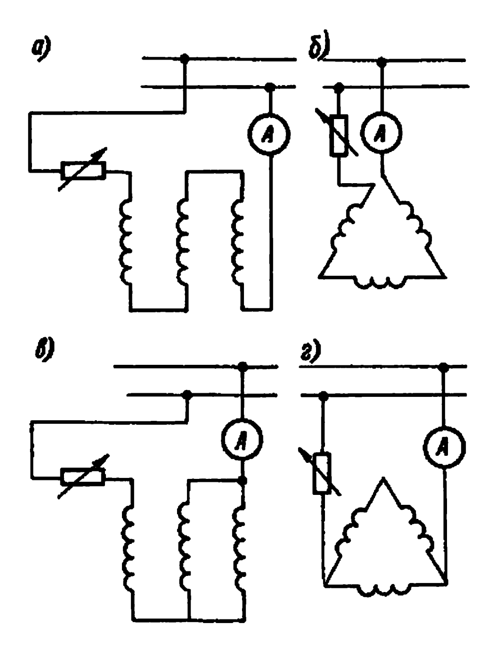


Рис. П10-4. Схемы для сушки асинхронного двигателя постоянным током: *а* и *б* — при наличии шести выводов обмотки; *в* и *г* — при наличии трех выводов обмотки

В случае нагревания бандажей выше 95 °С нужно уменьшить силу тока либо периодически выключать ток.

При сушке постоянным током машина должна быть неподвижна. Если выведены шесть концов обмотки статора, то все фазы включают последовательно (рис. П10-4, *а* и *б*) и через них пропускают переменный ток. Если разъединить обмотки фаз не представляется возможным, то сушку производят по схемам на рис. П10-4, *в* или *г*, приведенным для случаев соединения обмоток звездой и треугольником. При этом необходимо периодически переключать фазы для равномерного нагревания обмоток. Переключение производится каждые 2—4 ч в зависимости от размеров машины и скорости повышения температуры в начале сушки. Измерение температуры обмотки при таком способе сушки следует производить во всех фазах.

Значение необходимого напряжения определяется по омическому сопротивлению обмотки и по требуемой силе тока. Схема питания должна предусматривать возможность регулирования тока и длительную работу машины.

При сушке обмотки статора током обмотка ротора обычно высыхает и в отдельной сушке не нуждается. В противном случае ротор можно сушить отдельно, так же как и статор. Схемы на рис. П10-4 можно применять и для сушки однофазным током при замыкании фазного ротора накоротко. При применении однофазного тока следует учесть, что при сушке короткозамкнутых двигателей с двойной клеткой по схемам на рис. П10-4, *а, в* и *г* ротор должен быть вынут по причинам, указанным выше. Лишь при сушке по схеме на рис. П10-4, *б* (открытый треугольник) ротор может быть оставлен внутри статора.

3. Сушка синхронных машин. Синхронные машины можно сушить постоянным и переменным током. Сушка постоянным током производится во всем так же, как сушка асинхронных электродвигателей.

При сушке трехфазным током ротор должен быть вынут, так как от вращающегося поля статора в успокоительных обмотках и на поверхности бочки ротора, если машина является турбогенератором, возникает недопустимый перегрев от потерь в роторных контурах. Значение необходимого напряжения зависит от индуктивного сопротивления рассеяния при вынутом роторе и при токе сушки 0,5—0,7 номинального обычно находится в пределах 0,08—0,20 номинального напряжения.

Для того чтобы избежать чрезмерного нагревания роторных контуров, сушку можно производить однофазным током, причем обмотки должны быть включены по схеме разомкнутого треугольника (рис. П10-4, *б*). Только при таком соединении обмоток (в них будет лишь ток нулевой последовательности) отсутствует

трансформаторная связь с роторными контурами. Необходимое напряжение для сушки однофазным током находится примерно в тех же пределах, что и при сушке трехфазным током. Сушка током (потерями в обмотке) крупных машин очень затруднительна, так как для нее требуется значительный ток при нестандартных напряжениях; поэтому этот метод сушки для крупных машин практически не применяется.

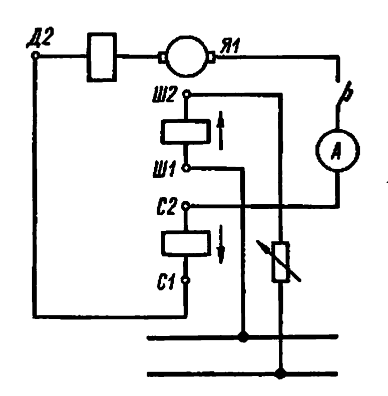
Г. СУШКА ТОКОМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ

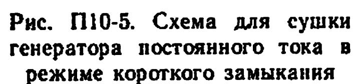
1. **Сушка генератора постоянного тока.** Этот способ сушки может применяться в тех случаях, когда возможна работа машин в качестве генератора. Якорную цепь машины (рис. П10-5) замыкают накоротко через автомат и амперметр; при наличии последовательной обмотки возбуждения ее включают встречно параллельной, т. е. на размагничивание, а параллельную обмотку возбуждения питают через реостат весьма большого сопротивления от независимого источника. Для питания обмотки возбуждения необходим небольшой ток.

При сушке током короткого замыкания должна быть обязательно учтена особенность работы генератора в этом режиме, выражающаяся в самовозбуждении генератора под влиянием добавочных полюсов, вызывающих подмагничивание основных полюсов.

При работе машины в качестве генератора в коммутируемых короткозамкнутых секциях, находящихся в нейтральной зоне, под действием поля добавочных полюсов (создающих обычно ускоренную коммутацию) образуется продольный магнитный поток $\Phi_{пр}$, совпадающий по направлению с остаточным полем основных полюсов, что усиливает поток последних (рис. П10-6).

Если последовательную обмотку и обмотку возбуждения включить согласно, то начавшийся процесс увеличения потока основных полюсов бурно развивается и приводит к чрезвычайно опасному большому току, что, как показал опыт, вызывает большие разрушения машины и несчастные случаи с людьми. Для предотвращения таких явлений последовательную обмотку возбуждения нужно включать встречно, т. е. на размагничивание, а при ее отсутствии щеточную траверсу надо немного сдвинуть по направлению вращения машины (обычно на 1—2 коллекторные пластины) с тем, чтобы продольная составляющая реакции якоря была больше намагничивающего действия добавочных полюсов.




Рис. П10-5. Схема для сушки генератора постоянного тока в режиме короткого замыкания

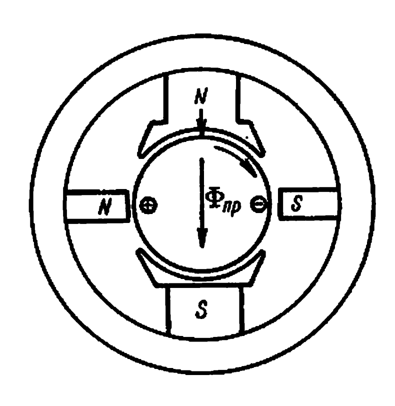


Рис. П10-6. Продольный намагничивающий поток от тока в коммутируемых секциях обмотки якоря при работе машины в генераторном режиме

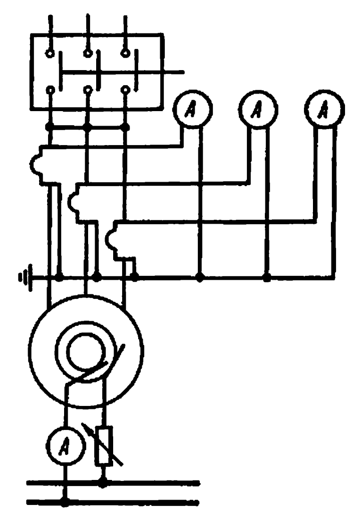
Перед сдвигом щеточной траверсы необходимо убедиться в том, что она действительно находится на нейтрали, и учесть, что машины с добавочными полюсами весьма чувствительны к сдвигу щеток.

Если при сдвиге щеточной траверсы с нейтрали возникнет недопустимое искрение на коллекторе, то можно прибегнуть к временному наложению на главные полюсы последовательной обмотки возбуждения из расчета один виток на полюс; в крупных машинах можно ограничиться наложением половинного числа витков.

При сушке машины постоянного тока в режиме короткого замыкания следует всегда иметь в виду возможность бурного возрастания тока в цепи якоря, опасного для машины и окружающих лиц. Перед сушкой необходимо убедиться в достаточности сдвига траверсы или в правильном включении последовательной размагничивающей обмотки возбуждения, не ограничиваясь проверкой ее полярности. Для этого производят пробное включение машины для работы в режиме короткого замыкания при установке автомата на пониженную силу тока с тем, чтобы при резком возрастании тока машина была немедленно отключена. При проверке необходимо учесть, что отключение тока большой силы рубильником вручную может оказаться опасным для лица, производящего отключение.

Лишь практически убедившись в том, что ток якоря поддается четкому и плавному регулированию изменением сопро-

Рис. П10-7. Схема для сушки генератора переменного тока в режиме короткого замыкания



тивления реостата в цепи параллельной обмотки возбуждения, а защита исправна, можно приступать к сушке.

Из изложенных соображений видно, что не следует на ходу машины перемещать траверсу для регулирования силы тока или же для устранения искрения.

Чтобы измерить температуру якоря и коллектора, машину следует остановить. Важно избежать частых остановок и пусков; поэтому измерения производятся реже, чем при сушке неподвижных обмоток. Параллельная обмотка в большинстве случаев отдельной сушке не подвергается, так как она обычно высыхает от тепла, выделяемого якорем.

2. Сушка генераторов переменного тока. При сушке током короткого замыкания генераторов переменного тока все три фазы статора замыкают накоротко (рис. П10-7). Замыкание должно быть сделано до масляного выключателя, так как при случайном его отключении при возбужденной машине на ее зажимах будет высокое напряжение, которое при влажной обмотке может привести к пробою изоляции. Если же закоротка не может быть установлена до выключателя, то цепь отключающей катушки нужно прервать, а выключатель заклинить для предотвращения возможности его отключения. Короткое замыкание должно быть выполнено надежно, токи во всех фазах должны быть одинаковы. При неравенстве токов в фазах или же при незамкнутой одной фазе может произойти значительное нагревание (полем обратной последовательности) роторных контуров; поэтому для контроля силы тока обязательна установка трех амперметров.

Генератор пускают в ход и при нормальной частоте вращения в обмотку возбуждения подают ток от собственного возбудителя или же от постороннего источника.

Сушку можно производить и при пониженной частоте вращения. Необходимо иметь в виду, что самовозбуждение возбудителя возможно лишь при определенной частоте вращения (не менее $^2/_3$ номинальной).

Для достижения необходимой температуры рекомендуется в машинах с проточной вентиляцией уменьшить количество охлаждающего воздуха, перекрыв шиберы или отрегулировав перепускание горячего воздуха в камеры холодного воздуха. В машинах с замкнутой системой вентиляции, когда воздух охлаждается специальными воздухоохладителями, следует в начале сушки прекратить подачу воды в воздухоохладитель, пока воздух не нагреется до 60—65 °С. Температуру поддерживают на этом уровне, регулируя подачу воды в охладитель.

Сушка крупных машин, например турбогенераторов, описанным методом неэкономична.

Д. СУШКА ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ ПОТЕРЯМИ

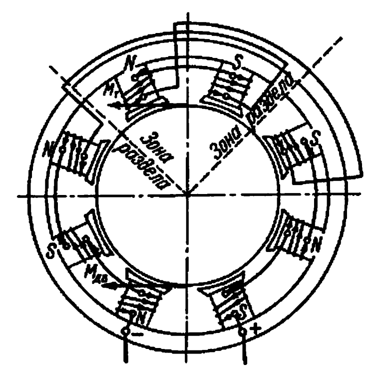
Этот метод сушки может применяться для быстроходных машин, например турбогенераторов, когда вентиляционные потери достаточны для получения необходимой температуры. Сушка производится при номинальной частоте вращения; цепь обмотки возбуждения должна быть разомкнута, для чего достаточно снять щетки с одного контактного кольца ротора. Обмотку статора для безопасности замыкают накоротко. В машинах с замкнутой системой охлаждения прекращают доступ воды в воздухоохладитель, а в машинах с проточной вентиляцией закрывают приток воздуха и выход его наружу, устраивая замкнутый цикл вентиляции путем перепускания воздуха из камеры горячего воздуха в камеру холодного воздуха.

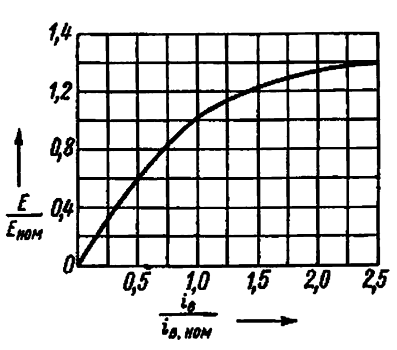
При этом методе сушки необходимо также периодически открывать на 5—10 мин люки в щитах генератора для удаления водяных паров. Регулирование температуры воздуха в зависимости от системы вентиляции производится так же, как и при сушке методом короткого замыкания (см. разд. Г).

Сушка методом вентиляционных потерь дает равномерную температуру нагрева, но является неэкономичной, как и сушка током короткого замыкания; поэтому для крупных машин этот метод имеет ограниченное применение.

Е. СУШКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА «ПОЛЗУЧЕЙ» ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

Метод сушки на весьма низкой, «ползучей», частоте вращения (порядка 1—2 % номинальной) может применяться для многополюсных двигателей с якорями, имеющими петлевую обмотку. Практически этот метод применим к тихоходным прокатным двигателям.





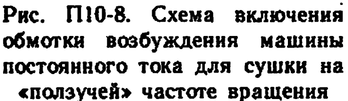

Рис. П10-8. Схема включения обмотки возбуждения машины постоянного тока для сушки на «ползучей» частоте вращения

Рис. П10-9. Универсальная характеристика намагничивания электрических машин

«Ползучая» частота вращения может быть получена, если изменить направление потока в части полюсов путем соответствующего пересоединения их выводных концов (рис. П10-8) и питать якорь током пониженного напряжения.

При такой схеме соединения часть полюсов, взаимодействуя с током якоря, создает движущий момент $M_д$, а другая часть полюсов — тормозящий момент $M_т$.

Эти два момента создают результирующий момент двигателя. В процессе разгона двигателя равенство его результирующего момента моменту нагрузки наступает при весьма незначительной, «ползучей», частоте вращения, при которой двигатель начинает работать устойчиво [24].

Разность между числом «движущих» и «тормозящих» полюсов при заданном потоке в них и заданном токе якоря определяет пусковой момент двигателя.

Ток сушки вращающегося якоря может быть принят равным току якоря в неподвижном состоянии, когда значение тока определяется сопротивлением цепи якоря и значением подведенного напряжения.

Опыт сушки машин по рассматриваемой схеме показывает, что обычно достаточно бывает изменить направление тока примерно в 30 % полюсов.

Разность чисел «движущих» и «тормозящих» полюсов может быть подсчитана по формуле

$$p_д - p_т = \frac{2pM^*_{пуск}}{\Phi^* I^*},$$

где $p_д$ и $p_т$ — число «движущих» и «тормозящих» полюсов; $2p$ — число полюсов машины; $M^*_{пуск}$ — пусковой момент двигателя; $Ф^*$, I^* — поток одного полюса и ток якоря в относительных единицах.

Момент холостого хода двигателя (без приводного механизма) составляет обычно величину, не превышающую 1,5—2 % номинальной, а ток сушки равен 50—60 % номинального. Учитывая, что момент трогания с места больше момента холостого хода, задаются пусковым моментом порядка 3—4 % номинального.

Поток полюса может быть принят равным 40—60 % номинального. Ток возбуждения при заданном потоке можно определять по характеристике намагничивания данной машины, считая, что поток пропорционален ЭДС, или при отсутствии такой характеристики — по универсальной характеристике намагничивания (рис. П10-9), или же, наконец, учитывая требуемую точность, ток возбуждения можно принять равным примерно 30—50 % номинального при потоке, составляющем 40—60 % номинального.

Для получения наиболее благоприятных условий работы двигателя в отношении действующих на якорь механических сил рекомендуется расположить «движущие» и «тормозящие» полюсы так, чтобы их ось симметрии находилась на горизонтальном диаметре.

Пример. Определим данные, необходимые для сушки прокатного электродвигателя постоянного тока.

Данные электродвигателя: мощность $P=2580$ кВт, ток $I=470$ А, напряжение $U=600$ В, частота вращения $n=70/160$ об/мин, число полюсов $2p=16$, ток возбуждения $i_{ном}=200$ А.

Полное сопротивление последовательной цепи якоря, включая ошиновку,

$$r_я=0,015 \text{ Ом}.$$

Примем $M^*_{пуск}=0,04$; $I^*=0,50$; поток полюса $Ф^*=0,40$.

Разность между числом «движущих» и «тормозящих» полюсов

$$p_д-p_т=\frac{2pM^*_{пуск}}{Ф^*I^*}=\frac{16\cdot 0,04}{0,40\cdot 0,50}=3,2.$$

Округляя, примем $p_д=10$; $p_т=6$.

Пользуясь универсальной характеристикой намагничивания (рис. П10-9), получим, что ток возбуждения i при $Ф^*=0,4$ составляет

$$0,33i_{ном}=0,33\cdot 200=66 \text{ А}.$$

Напряжение на зажимах генератора, питающего двигатель,

$$U_г = Ir_я = 0{,}5 \cdot 4700 \cdot 0{,}015 \approx 35 \text{ В}.$$

При сушке двигателя необходимо цепь возбуждения оберегать от обрыва, так как в этом случае двигатель подвергается опасности разгона; в цепи возбуждения не должно быть предохранителей. Во избежание подгорания коллекторных пластин необходимо следить за тем, чтобы двигатель не останавливался, что может произойти, например, от снижения напряжения, подводимого к якорю, или же от резкого возрастания момента нагрузки. Кроме того, при сушке (так же как и при других методах сушки током) необходимо следить за температурой стыковых соединений всех последовательных обмоток машины, так как недостаточно плотные контакты могут вызвать чрезмерный нагрев и повреждения соединений.

Рассмотренный метод сушки крупных прокатных двигателей постоянного тока на «ползучей» частоте вращения является эффективным, так как частота вращения двигателя весьма устойчива, производится одновременная сушка всех обмоток машины, вращение якоря предотвращает подгорание коллекторных пластин, представляется возможным проверить все контакты ошиновки и паек в последовательных обмотках машины. Кроме того, одновременно с сушкой двигателя может производиться и сушка генераторов преобразовательного агрегата, от которого двигатель получает ток для сушки, что экономит время и позволяет сократить сроки ввода машин в эксплуатацию.

Ж. СУШКА ПОТЕРЯМИ В АКТИВНОЙ СТАЛИ СТАТОРА

Нагревание в этом случае получается за счет создания в активной стали статоров машин переменного тока магнитного потока путем накладывания на статор специальной намагничивающей обмотки, питаемой однофазным током (рис. П10-10). Обмотка охватывает также и корпус статора; благодаря значительной разнице в магнитных проводимостях корпуса и активной стали в корпус будет ответвляться незначительный поток.

Сушка машин с большим воздушным зазором, например турбогенераторов, может производиться при вынутом и вставленном роторе. В первом случае ротор можно сушить отдельно. Сушка машин с малым воздушным зазором, например асинхронных двигателей, производится при вынутом роторе, так как небольшой зазор в этих двигателях не позволяет поместить намагничивающую обмотку. Сушка асинхронных двигателей может производиться и при вставленном роторе, если имеются

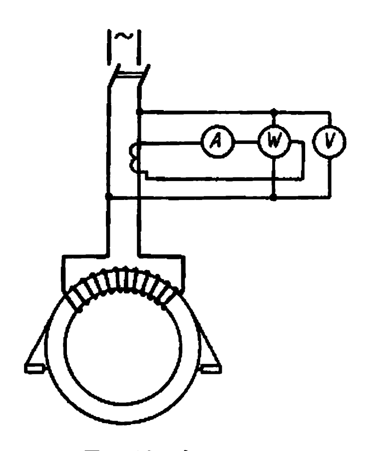


Рис. П10-10. Схема включения намагничивающей обмотки для сушки статоров машин переменного тока

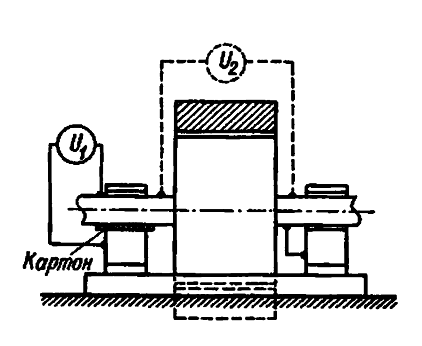


Рис. П10-11. Изоляция вала ротора при сушке

отверстия в крестовине ротора, позволяющие наложить намагничивающую обмотку, охватывающую одновременно сталь статора и ротора. При таком методе сушки необходимо следить за нагреванием бандажей, не допуская повышения их температуры выше 95 °С.

При сушке со вставленным ротором последний должен быть изолирован от фундаментной плиты, чтобы не образовался короткозамкнутый контур «вал — подшипники — фундаментная плита», в котором могут циркулировать чрезмерно большие токи. Для изоляции вала ротора подкладывают под одну из шеек вала картон (рис. П10-11). Изоляцией вала может служить также изоляция подшипника, имеющаяся в некоторых машинах для предотвращения циркуляции токов в подшипниках.

В процессе сушки необходимо контролировать состояние изоляции вала. Для этого измеряют напряжение между валом и подшипником (рис. П10-11), в котором проложена изоляция; при измерении масляный слой второго подшипника должен быть зашунтирован. При хорошей изоляции вала напряжение U_1 должно быть примерно равно напряжению U_2 на концах вала.

Сопротивление изоляции обмотки статора можно измерять при включенной намагничивающей обмотке, так как поток, пульсирующий в активной стали, не пересекает витков обмотки статора и в последней не индуктируется ЭДС.

Измерение сопротивления изоляции обмотки ротора синхронной машины не рекомендуется производить при включенной

на статоре намагничивающей обмотке независимо от расположения на валу контактных колец (с одной или с обеих сторон ротора). Дело в том, что если ротор заземлен, то при измерении сопротивления изоляции обмотки ротора относительно корпуса, производимом мегомметром, в измерительный контур вводится ЭДС, равная ЭДС одного витка намагничивающей обмотки.

При сушке методом потерь в активной стали необходимо применять меры предосторожности. В расточке статора не должно быть металлических предметов, которые могут вызвать замыкание листов активной стали и ее повреждение. При измерении температуры с помощью термопар нельзя в процессе переключений замыкать концы двух термопар; в противном случае может образоваться контур, в котором также будет индуктироваться ЭДС, равная ЭДС одного витка намагничивающей обмотки.

Если сушке рассматриваемым методом подвергается турбогенератор со вставленным ротором, то необходимо регулярно поворачивать ротор (например, валоповоротным устройством). Момент окончания сушки определяется окончанием сушки изоляции статорной обмотки; при этом обмотку ротора в случае необходимости досушивают при нагрузке.

Число витков намагничивающей обмотки определяется по формуле

$$W=45U/(QB),$$

где U — напряжение на концах намагничивающей обмотки, В; Q — сечение активной стали, см^2; B — индукция, Тл;

$$Q=kl_ch_c=k(l-nb)h_c,$$

где k — коэффициент заполнения стали, который для лакированной стали принимается равным 0,95, а для бумажной изоляции 0,9; l_c — длина активной стали статора без вентиляционных каналов, см; h_c — высота активной стали (без зубцового слоя), см; l — полная длина активной стали, см; b — ширина вентиляционного канала, см; n — число каналов (рис. П10-12).

Индукция B берется обычно в пределах 0,6—0,8 Тл. Для определения тока необходимо вычислить требуемую магнитодвижущую силу:

$$F=\pi D_{ср}H,$$

где $D_{ср}$ — средний диаметр активной стали статора, см; H — напряженность магнитного поля, А/см (на 1 см длины магнитопровода), зависящая от сорта активной стали. Ориентировочно при слабо- и среднелегированной стали для $B=0{,}6$; 0,7 и 0,8 Тл можно принять H равным соответственно 1,4; 1,8;

2,2 А/см, а для электротехнической стали — соответственно 2,2; 2,8; 3,7 А/см.

Силу тока определяют по формуле

$$I = F/w.$$

Для намагничивающих обмоток используют провод марки ПР или ПРГ, применение же освинцованного или бронированного кабеля недопустимо; токовая нагрузка на провода не должна превышать 60—70 % допустимой нагрузки при их нормальной прокладке, что продиктовано значительной температурой в воздушном зазоре. Обмотка должна быть изолирована от активной стали прокладками из асбеста, картона и пр.

Для регулирования температуры стали следует изменять индукцию. Для этого необходимо либо изменять напряжение на концах обмотки, либо изменять число ее витков. В последнем случае необходимо иметь в виду, что при неизменном напряжении увеличение числа витков уменьшает индукцию в стали и, следовательно, потери в ней, а уменьшение числа витков, наоборот, увеличивает потери. В начале сушки для более быстрого подъема температуры рекомендуется увеличить индукцию. Для более эффективной сушки обмотки статора рекомендуется тщательно утеплить лобовые части обмотки асбестом и накладываемым поверх него брезентом и предотвратить возможность засасывания холодного воздуха внутрь машины.

Характерные кривые изменения температуры обмотки статора, сопротивления ее изоляции и коэффициента абсорбции (отношение r_{60}/r_{15} — см. разд. А) в процессе сушки турбогенератора даны на рис. П10-13 [10]. Следует отметить, что у сухой обмотки с повышением температуры коэффициент абсорбции падает.

Пример. Пусть требуется рассчитать намагничивающую обмотку для сушки статора асинхронного двигателя со следующими размерами активной стали: $D_{внешн} = 250$ см; $D_{внутр} = 197$ см; полная длина активной стали $l = 95$ см; число вентиляционных каналов 15, каждый шириной 1 см.

Для определения числа витков намагничивающей обмотки найдем сечение активной стали:

$$Q = 0{,}95(l - nb)h_c = 0{,}95(l - nb)\frac{D_{внешн} - D_{внутр}}{2} =$$

$$= 0{,}95 \cdot (95 - 15 \cdot 1)\frac{250 - 197}{2} = 2014 \text{ см}^2.$$

Примем $B = 0{,}6$ Тл (учитывая, что индукция может быть увеличена снятием витков) и напряжение $U = 380$ В, тогда

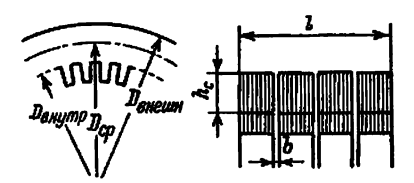


Рис. П10-12. Активная сталь статора

$$w = \frac{45U}{QB} = \frac{45 \cdot 380}{2014 \cdot 0{,}6} = 14 \text{ витков.}$$

Требуемая магнитодвижущая сила

$$F = \pi D_{ср} H = \pi \frac{D_{внешн} + D_{внутр}}{2} H =$$

$$= 3{,}14 \frac{250 + 197}{2} 1{,}4 \approx 980 \text{ А.}$$

Сила тока

$$I = F/w = 980/14 = 70 \text{ А.}$$

Для выполнения обмотки берем провод марки ПР сечением 35 мм^2 и наматываем равномерно вокруг статора 14 витков.

В качестве витка намагничивающей обмотки может быть использован вал ротора. Для этого на концах вала ротора устанавливают специальные хомуты, плотно охватывающие вал; к ним присоединяют питающие провода. Ток, необходимый для сушки, определяют по вышеприведенным формулам, но число витков принимают равным единице.

Для сушки таким методом требуется низкое напряжение, которое может быть получено от сварочного трансформатора

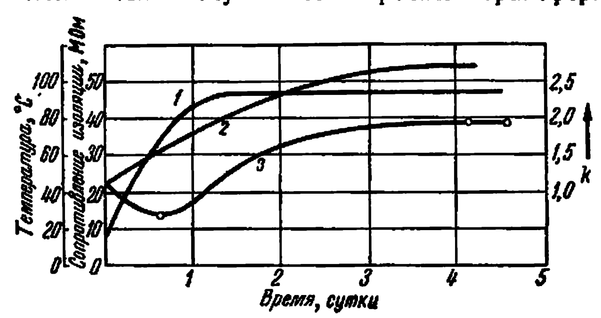


Рис. П10-13. Кривые сушки генератора потерями в активной стали
1 — температура обмотки статора; 2 — коэффициент k; 3 — сопротивление изоляции

либо от обычного трансформатора напряжением 6000/230 или 6000/400 В при включении обмотки высшего напряжение в сеть 220 либо 380 В. Здесь также необходимо, чтобы один конец вала был изолирован; кроме того, во избежание короткого замыкания необходимо, чтобы источник питания не имел заземления.

При сушке методом потерь в активной стали статоров крупных быстроходных машин с развитыми лобовыми частями статорной обмотки (например, турбогенераторов) может оказаться, что температура обмотки будет недостаточной. В этом случае целесообразно применить комбинированный метод сушки, дополнительно подогревая лобовые части обмоток горячим воздухом от воздуходувки. Можно также дополнительно нагревать обмотку статора постоянным током или же однофазным током, но при обмотке статора, включенной открытым треугольником.

Производить одновременную сушку статора потерями в активной стали, а ротора — постоянным током не следует, так как вследствие насыщения стали статора сильно увеличивается намагничивающий ток.

В заключение укажем, что метод сушки потерями в активной стали применяется не только для машин переменного тока, но с успехом используется и для якорей машин постоянного тока. Этим методом был высушен якорь электродвигателя 5150 кВт, 50 об/мин при помощи двух сварочных трансформаторов по 50 и 397 А каждый, соединенных параллельно. Этот метод является эффективным (особенно для крупных машин), так как позволяет произвести сушку машины в неподвижном состоянии еще до окончания монтажа всей установки в целом и тем значительно сократить сроки ввода оборудования в эксплуатацию. Кроме того, при сушке этим методом значительно сокращается расход энергии. Лишь для небольших машин сушка потерями в активной стали малопригодна, так как требует большого числа витков намагничивающей обмотки.

3. СУШКА ПОТЕРЯМИ В КОРПУСЕ СТАТОРА

При этом методе сушки нагревание машины достигается за счет индукционных потерь в корпусе статора от воздействия тока намагничивающей обмотки, наматываемой на корпус и питаемой однофазным переменным током. Для сушки машин крупных габаритов этим способом требуется намотка большого числа витков и нужен источник питания большой мощности; поэтому в этих случаях он не применяется.

Схема включения намагничивающей обмотки дана на

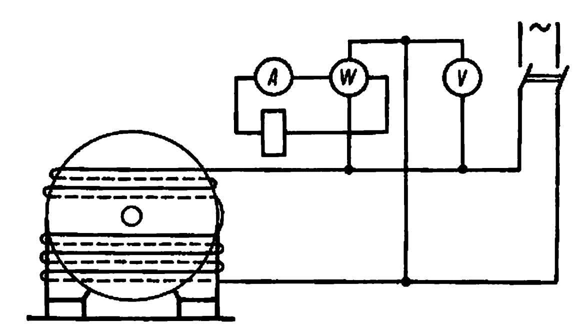


Рис П10-14. Схема включения намагничивающей обмотки для сушки потерями в корпусе статора

рис. П10-14. В качестве источников питания наиболее удобными являются сварочные трансформаторы, дающие низкое напряжение и позволяющие регулировать силу тока.

Если необходимо высушить несколько машин, можно использовать и более высокое напряжение по сравнению с тем, что дают вторичные обмотки сварочных трансформаторов, например 220 В, включив намагничивающие обмотки машин последовательно. Намагничивающую обмотку накладывают поверх утепленного асбестом корпуса; ее можно располагать горизонтально или вертикально. Для более равномерного нагревания рекомендуется при горизонтальном расположении обмотки бо́льшую часть витков помещать в нижней половине корпуса. При наличии отверстий в корпусе обмотка может быть пропущена через них. Регулирование температуры нагрева производится периодическим выключением тока. Расчет намагничивающей обмотки может быть произведен аналогично расчету ее при сушке транс-

Таблица П10-1

Данные электрической машины			Данные намагничивающей обмотки		
Напряжение, В	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Напряжение, В	Число витков	Ток, А
500	40	960	25	8	120
6000	260 500 1400 1565 2500	730 1000 990 3000 1000	65 65 220 25 65	2×15 16 12 6 26	2×34 90 118 200 140

форматоров потерями в корпусе (см. приложение 11). Число витков обмотки может быть подобрано и опытным путем.

В табл. П10-1 приводятся данные [1] намагничивающих обмоток, примененных для сушки ряда машин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

СУШКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

А. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В условиях эксплуатации необходимость высушить трансформатор возникает в случае отсыревания изоляции обмоток или после ремонта с полной или частичной сменой обмотки или изоляции. В последнем случае сушка производится независимо от значения сопротивления изоляции.

При определении необходимости сушки трансформаторов следует руководствоваться следующим [21]:

а) трансформаторы напряжением 35 кВ и ниже, прошедшие капитальный ремонт, могут быть включены без сушки, если их выемная часть находилась в воздухе с влажностью не выше 75 % не более 24 ч;

б) если же во время ремонта температура выемной части поддерживается выше температуры воздуха не менее чем на 3—5 °С, то допустимая продолжительность пребывания выемной части в воздухе утраивается;

в) трансформатор может быть вскрыт для ремонта при условии, если температура окружающего воздуха приблизительно равна температуре верхних слоев масла трансформатора или ниже ее; при относительной влажности воздуха ниже 75 % температура верхних слоев масла перед вскрытием трансформатора должна быть выше температуры воздуха не менее чем на 10 °С.

Определение необходимости сушки трансформаторов после капитального ремонта, выемная часть которых находилась в воздухе дольше указанного выше срока или при повышенной влажности, производится на основании соответствующих измерений сопротивления изоляции, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Включение масляных трансформаторов без сушки после монтажа возможно лишь при соблюдении определенных условий [21].

Наиболее эффективным способом сушки выемной части

трансформатора является сушка в собственном баке с применением вакуума и нагревом методом потерь в стали бака.

Возможна сушка трансформатора таким же способом без применения вакуума, но с вентиляцией выемной части горячим воздухом для удаления влаги.

Сушку можно также производить и в специально изготовленном утепленном шкафу горячим воздухом, подаваемым воздуходувкой.

Сушка изоляции небольших трансформаторов может производиться методом инфракрасного облучения [1]. В качестве источника инфракрасного облучения применяются специальные лампы, а при их отсутствии — обычные осветительные лампы.

Применявшаяся ранее сушка изоляции обмоток трансформаторов масловаркой является неэффективной и, кроме этого, вызывает порчу масла; поэтому этот способ сушки запрещен.

Б. СУШКА ТРАНСФОРМАТОРА В СОБСТВЕННОМ БАКЕ БЕЗ ВАКУУМА

Перед сушкой удаляют масло из бака и вытирают его насухо. На выемной части трансформатора устанавливают термометры сопротивления или термопары для контроля температуры. Выемную часть опускают в бак и закрывают крышкой.

Бак трансформатора утепляют двумя слоями асбестовых листов толщиной 4—5 мм, закрепляемых шпагатом или лентой (применение проволоки не рекомендуется); утепление может производиться также листами стеклоткани. Кроме этого, для уменьшения потерь тепла рекомендуется поместить трансформаторы в утепленную камеру (рис. П11-1).

Поверх изоляции бака наматывают намагничивающую обмотку. При отсутствии утепления намагничивающую обмотку наматывают на деревянные рейки толщиной 3—5 см.

Если трансформатор снабжен съемными радиаторами, то их снимают. У трансформаторов с трубчатыми или ребристыми баками намагничивающую обмотку укладывают по боковой поверхности поверх труб или ребер, но можно укладывать ее через дно и крышку бака.

Чтобы получить более равномерное распределение температуры, намагничивающую обмотку наматывают на нижнюю часть бака, занимая 40—60 % высоты бака; внизу бака витки располагают ближе друг к другу. Для намагничивающей обмотки используют провод с асбестовой изоляцией марки ПДА; воз-

---

[1] См. книгу: К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин. М., 1967.

Таблица П11-1

Мощность трансформатора, кВ·А	Периметр, м	Температура окружающей среды, °С	Напряжение намагничивающей обмотки, В					
			65		120		220	
			Число витков	Ток, А	Число витков	Ток, А	Число витков	Ток, А
100	2,4	0	47/30	37/91	—	—	—	—
		15	52/36	31/74	—	—	—	—
		30	53/39	26/64				
180	2,54	0	45/33	42/103	—	—	—	—
		15	49/34	35/88	—	—	—	—
		30	50/37	29/72	—	—	—	—
320	2,75	0	42/30	60/124	—	—	—	—
		15	44/32	42/106	—	—	—	—
		30	47/34	35/87	—	—	—	—
560	3,52	0	34/24	80/198	63/45	43/107	—	—
		15	35/26	68/168	67/47	37/91	—	—
		30	38/28	56/138	71/51	30/75	—	—
750	3,94	0	29/21	105/264	54/39	54/143	100/71	32/66
		15	31/22	89/224	57/42	48/121	105/76	28/56
		30	33/24	74/184	61/145	40/100	112/82	23/46
1000	4,04	0	29/21	124/315	53/38	67/170	98/70	37/79
		15	30/22	107/265	56/41	58/144	103/75	31/66
		30	32/24	88/129	60/44	48/119	110/81	29/55

Примечание. Величина в числителе дроби действительна, если кожух утеплен, величина в знаменателе — если утепление отсутствует.

можно применение проводов и других марок (ПР, ПРТО), но в последнем случае нагрузку током уменьшают до 60—70 % допустимой при нормальной прокладке. Ориентировочные данные для выбора намагничивающей обмотки трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А с трубчатыми кожухами приведены в табл. П11-1 [29].

Ниже приводится ориентировочный расчет намагничивающей обмотки для сушки трансформаторов мощностью более 1000 кВ·А.

Мощность, необходимая для сушки (в киловаттах),

ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A
0,1	4,21	1,0	1,85	1,9	1,47	2,8	1,27
0,2	3,20	1,1	1,78	2,0	1,44	2,9	1,26
0,3	2,76	1,2	1,72	2,1	1,42	3,0	1,24
0,4	2,48	1,3	1,68	2,2	1,39	3,25	1,20
0,5	2,30	1,4	1,63	2,3	1,37	3,50	1,18
0,6	2,17	1,5	1,60	2,4	1,35	3,75	1,15
0,7	2,06	1,6	1,55	2,5	1,32	4,0	1,12
0,8	1,97	1,7	1,53	2,6	1,31	—	—
0,9	1,90	1,8	1,49	2,7	1,29	—	—

$$P = kF(100 - t_0)\,10^{-3},$$

где F — площадь поверхности бака трансформатора, м^2; t_0 — температура окружающей среды, °C; k — коэффициент, равный 5 при утепленном баке и 12 — при неутепленном.

Значение удельных потерь (в киловаттах на квадратный метр)

$$\Delta P = P/F_0,$$

где F_0 — площадь поверхности бака, охватываемой намагничивающей обмоткой, м^2, равная

$$F_0 = lh,$$

где l — периметр бака, м; h — высота поверхности, занятой намагничивающей обмоткой, м.

Число витков намагничивающей обмотки

$$w = UA/L,$$

где U — напряжение, подводимое к обмотке, В; L — длина одного витка, м; A — длина намагничивающей обмотки, приходящаяся на 1 В напряжения, подводимого к обмотке.

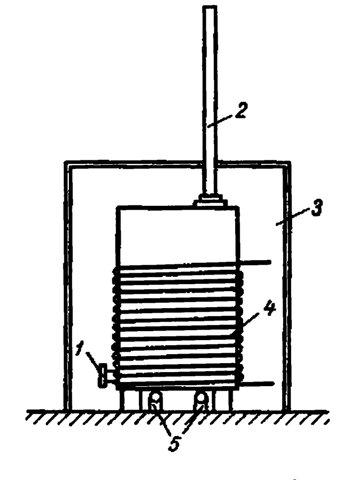


Рис. П11-1. Схема сушки трансформатора в собственном баке

1 — фланец маслосливного крана; *2* — трубка для вентиляции; *3* — утепленная камера; *4* — намагничивающая обмотка; *5* — электронагреватель закрытого типа

Величину A находят по табл. П11-2.

Ток в намагничивающей обмотке

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi},$$

где $\cos \varphi = 0{,}5 \ldots 0{,}7$.

Пример. Определим данные для намагничивающей обмотки трансформатора типа ТМ 1800/10.

Периметр бака $l = 4{,}66$ м, площадь его поверхности $F = 14{,}6$ м^2. Бак трансформатора утеплен, температура окружающего воздуха $t_0 = 20$ °С.

Мощность, необходимая для сушки,

$$P = kF(100 - t_0) \cdot 10^{-3} = $$
$$= 5 \cdot 14{,}6 (100 - 20) \cdot 10^{-3} = 5{,}84 \text{ кВт}.$$

Высоту h примем равной 1,4 м.

Площадь поверхности бака, занятой обмоткой,

$$F_0 = lh = 4{,}66 \cdot 1{,}4 = 6{,}5 \text{ м}^2.$$

Удельные потери

$$\Delta P = P/F_0 = 5{,}84/6{,}5 = 0{,}9 \text{ кВт/м}^2.$$

По табл. П11-2 для $\Delta P = 0{,}9$ находим $A = 1{,}9$.

Число витков намагничивающей обмотки для напряжения 127 В (принимаем $L = l$)

$$w = \frac{UA}{L} = \frac{127 \cdot 1{,}9}{4{,}66} = 52.$$

Ток в намагничивающей обмотке

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{5840}{127 \cdot 0{,}6} \approx 77 \text{ А}.$$

Для намагничивающей обмотки берем провод сечением 25 мм^2.

В качестве источника питания намагничивающей обмотки может служить сварочный трансформатор, трансформатор для прогрева бетона или сеть напряжением 127/220 В.

В процессе сушки выемную часть трансформатора вентилируют для удаления влаги при помощи вентилятора, отсасывающего воздух через один из люков в крышке трансформатора или через отверстие для изолятора. Воздух поступает в бак через фланец маслосливного крана (рис. П11-1). Можно устроить и естественную вентиляцию путем установки на крышке бака вертикальной трубы высотой 2—2,5 м. Воздух в утепленную

камеру поступает через отверстие в ее нижней части. Температура бака должна повышаться постепенно, рост температуры не должен превосходить 30—40 °С/ч. Температура горячего воздуха внутри бака должна поддерживаться на уровне 100—105 °С. Регулирование температуры производится либо изменением числа витков намагничивающей обмотки, либо ее периодическим отключением. В первом случае нужно сделать одну-две отпайки от намагничивающей обмотки.

Для более интенсивной сушки рекомендуется периодически снижать температуру до 50—60 °С и снова повышать ее до 100—105 °С.

Во время сушки ведется журнал, в который каждый час записывают показания всех термометров, силу тока, напряжение и число витков намагничивающей обмотки; каждые два часа — сопротивление изоляции между обмотками и по отношению к корпусу.

Об окончании сушки судят по форме кривой сопротивления изоляции (она аналогична форме кривой сопротивления изоляции при сушке электрических машин — см. приложение 10, рис. П10-13). Сушка считается законченной, если сопротивление изоляции обмоток при установившейся температуре 100—105 °С имеет устойчивое значение в течение 6—8 ч.

После сушки производят осмотр выемной части, удаляют термометры, проверяют и затягивают крепления; после этого выемную часть опускают в бак, который заполняют чистым, сухим трансформаторным маслом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРОВ, БИЕНИЙ И ВИБРАЦИЙ

А. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ РОТОРОМ И СТАТОРОМ

Измерение зазора производят щупами длиной 250 мм, состоящими из набора калиброванных пластин, или же при больших зазорах (в турбогенераторах) специальным щупом. При отсутствии такого щупа можно изготовить набор щупов (рис. П12-1) из проволоки диаметром 2—3 мм и проверить их штангенциркулем. Такой щуп вводят в зазор плашмя параллельно оси машины, а затем для измерения поворачивают на 90° (устанавливая в положение, изображенное на рис. П12-1).

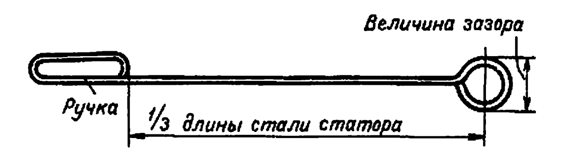


Рис. П12-1. Проволочный щуп для измерения больших зазоров между ротором и статором

При измерениях щуп должен соприкасаться со сталью статора (полюсов) и ротора (якоря), не попадая на пазовый клин или бандаж. При работе необходимо следить за тем, чтобы места измерений и поверхность щупа были чистыми.

Зазор измеряют с обеих сторон машины в нескольких точках, обычно в четырех, сдвинутых относительно друг друга на 90°. В машинах большого диаметра измерение производят в шести или восьми точках. В машинах постоянного тока и в явнополюсных синхронных машинах измерения производят под серединой каждого полюса. Измеряют 3—4 раза, каждый раз поворачивая ротор или якорь на 90°. Средним зазором в каждой данной точке является среднее арифметическое всех полученных значений в данной точке.

Если при указанных измерениях во всех точках получаются значительные отклонения в величине зазоров при различных положениях ротора, то необходимо проверить совпадение осей и цилиндричность поверхностей статора и ротора.

Для проверки формы расточки статора его окружность разделяют на 6, 8, 12 и т. д. частей (рис. П12-2) в зависимости от диаметра статора. В машинах постоянного тока берут число точек, равное числу полюсов. К каждой точке статора или к каждому полюсу подводят одну и ту же точку ротора или якоря (точку *б*) и измеряют зазор. Для проверки цилиндричности поверхности ротора поступают аналогично, разделяя на столько же равных частей окружность в синхронных машинах с явно выраженными полюсами, число точек берут равным числу полюсов. В этом случае каждую из указанных точек ротора подводят к одной и той же точке статора (точке *а*) и производят измерения.

Средним зазором в машине является среднее арифметическое значе-

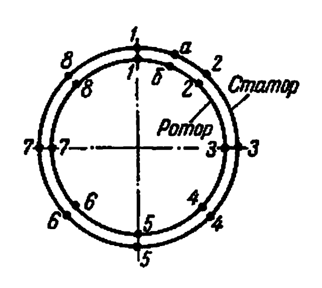


Рис. П12-2. Проверка формы расточки статора и ротора

Таблица П12-1

Точки статора	Точки ротора					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6						

ние всех измеренных зазоров. Наибольшие отклонения от среднего зазора имеют место в точках совмещения наибольшего радиуса статора с наименьшим радиусом ротора и наименьшего радиуса статора с наибольшим радиусом ротора. Анализировать результаты измерений удобно, если они записаны по форме табл. П12-1.

Регулирование зазора между ротором и статором производят, изменяя толщину и число прокладок под лапами статора и передвигая статор по горизонтали. При монтаже иногда статор опускают на 0,2—0,3 мм, но в пределах допустимых отклонений, для получения внизу несколько бо́льшего зазора.

Наибольшие отклонения измеренных зазоров не должны превышать (по данным завода «Электросила») следующих величин:

Измеренный наименьший зазор до 0,5 мм . . . . . + 10 %

Измеренный средний зазор, мм:

0,6—10 . . . . ±10 %

10—20 . . . . ± 1 мм

больше 20 . . . . ± 5 %

Для добавочных полюсов в машинах постоянного тока допустимое отклонение от среднего зазора составляет ±5 %.

Б. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРОВ В ПОДШИПНИКАХ

Измерение зазора между верхней половиной вкладыша и шейкой вала обычно производят при помощи свинцовой проволоки диаметром 1,0 мм и длиной 40—50 мм. Кусочки проволоки укладываются на плоскости разъема нижней половины вкладыша с обеих сторон, а также на вал, как это указано на рис. П12-3, *а*. Затем, установив верхнюю половину вкладыша и крышку подшипника, затягивают болты, в результате чего проволочки сплющиваются. По их толщине, измеренной микрометром, определяется верхний зазор между шейкой вала и верх-

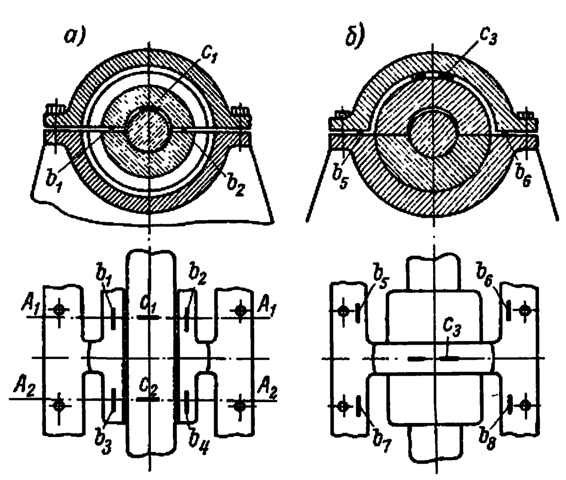


Рис. П12-3. Измерение зазоров: *а* — между шейкой вала и вкладышем; *б* — между крышкой подшипника и верхним вкладышем

ней половиной вкладыша. Эти зазоры a_1 и a_2 в поперечной плоскости A_1A_1 и A_2A_2 будут соответственно равны:

$$a_1 = c_1 - \frac{b_1 + b_2}{2}; \quad a_2 = c_2 - \frac{b_3 + b_4}{2},$$

где c_1, c_2, b_1, b_2, b_3 и b_4 — толщины соответствующих проволочек. Разница между a_1 и a_2 не должна превышать 10 %.

Между крышкой подшипника и верхним вкладышем зазор не должен превышать 0,05 мм. Он может быть определен при помощи таких же отрезков свинцовой проволоки, укладываемых между крышкой подшипника и верхним вкладышем и в плоскости разъема между верхней крышкой подшипника и стояком (рис. П12-3, *б*). Зазор между крышкой подшипника и вкладышем будет

$$a_3 = c_3 - \frac{b_5 + b_6 + b_7 + b_8}{4},$$

где c_3, b_5, b_6, b_7, b_8 — толщины соответствующих сплющенных проволочек. Размеры клиновидных щелей (боковые зазоры) измеряются щупом при роторе, установленном на подшипники.

Зазоры в подшипниках должны соответствовать данным завода-изготовителя. В тех случаях, когда последние отсутствуют, можно руководствоваться приведенными ниже ориентировочными данными.

При определении необходимой величины зазоров следует иметь в виду, что согласно гидродинамической теории смазки

Таблица П12-2

Диаметр вала, мм	Пределы верхнего (вертикального) зазора, мм, при частоте вращения, об/мин		
	до 1000	1000—1500	свыше 1500
18—30	0,04—0,093	0,060—0,130	0,14—0,280
30—50	0,05—0,112	0,075—0,160	0,170—0,340
50—80	0,065—0,135	0,095—0,195	0,200—0,400
80—120	0,080—0,160	0,120—0,235	0,230—0,460
120—180	0,100—0,195	0,150—0,285	0,260—0,530

при увеличении зазора против требуемого для заданных условий работы уменьшается подъемная сила масляного клина, а также толщина смазочного слоя. Это сокращает нагрузочную способность подшипника и увеличивает потери на трение. Поэтому при небольших скоростях шеек, т. е. в тихоходных машинах, зазор делают меньшим, чем в быстроходных, так как в этом случае для получения необходимой подъемной силы масляного клина необходим меньший зазор, причем чем больше нагрузка шейки, тем относительно меньше должен быть зазор. При больших скоростях шеек условия для образования масляного клина более благоприятны, и поэтому зазоры в быстроходных машинах могут быть сделаны бóльшими, чем в тихоходных.

В неразъемных подшипниках (втулках) небольших машин с кольцевой смазкой посадку вала во втулках обычно делают с гарантированным зазором d8 и d9. Лишь при частоте вращения менее 1000 об/мин некоторые заводы применяют посадку e8. В табл. П12-2 приведены ориентировочные величины пределов диаметральных (верхних) зазоров между шейкой вала и вкладышем в неразъемных вкладышах подшипников с кольцевой смазкой. Этой таблицей можно пользоваться для машин до 1000 кВт при частоте вращения до 1500 об/мин включительно и для машин до 200 кВт при 3000 об/мин.

Диаметральные (верхние) зазоры *а* (рис. П12-4) в разъемных вкладышах подшипников с кольцевой смазкой обычно находятся в пределах 0,15—0,25 % диаметра шейки вала. Верхний предел относится к быстроходным машинам, нижний — к тихоходным. При этом предполагается, конечно, что указанный диаметральный зазор соответствует цилиндрической расточке вкладыша, так как только при этом он определяет форму масляного клина между шейкой и вкладышем.

Боковые (горизонтальные) зазоры *б* без учета продольных канавок (карманов), отнесенных к плоскости разъема, должны составлять на сторону 0,5 верхнего зазора.

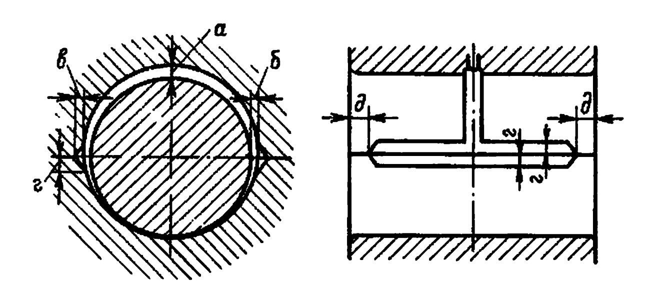


Рис. П12-4. Зазоры в подшипниках

В подшипниках с циркуляционной смазкой верхние зазоры делаются больше, чем при кольцевой смазке, так как при больших окружных скоростях и значительных нагрузках требуется больший расход масла для охлаждения шейки и вкладыша. **Увеличение верхнего зазора не должно сказываться на величине масляного клина**, что будет обеспечено при сохранении необходимого радиуса расточки нижней половины вкладыша. Обычно в подшипниках с циркуляционной смазкой верхние зазоры находятся в пределах 0,25—0,40 % диаметра шейки, а в некоторых случаях доходят до 1,2 %.

Ориентировочные данные по продольным канавкам (карманам) для разъемных вкладышей приведены в табл. П12-3.

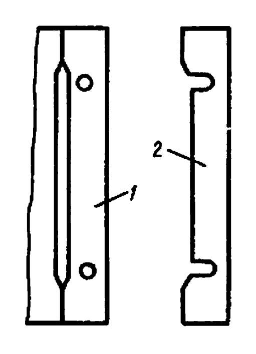
Если в верхней половине вкладыша нужно увеличить верхний зазор между шейкой вала и вкладышем, то делают выточку необходимой глубины. Чтобы уменьшить вытекание масла вдоль оси вкладыша, выточку не доводят до краев, оставляя у торцов пояски с нормальным требуемым диаметром расточки вкладыша.

Таким образом, указанное увеличение верхнего зазора должно быть достигнуто специальной обработкой верхней половины вкладыша. Если, однако, при наладке машины или при сроч-

Таблица П12-3

Размер на рис. П12-4	Диаметр вкладыша, мм													
	45—50	60—70	80—90	100—110	125—140	160—180	200—220	240—260	280—300	320—340	360—380	400—420	440—460	480—500
	Размеры продольных канавок в разъемных вкладышах подшипников, мм													
в	1	1	1,5	2	2	3	4	4,5	5	6	7	7,5	8	9
г	7	8	10	13	16	20	25	33	35	40	45	50	55	60
д	8	8	10	10	12	12	15	15	18	18	20	20	25	25

Рис. П12-5. Прокладка в стыке вкладышей
1 — вкладыш; 2 — прокладка



ном ремонте нет возможности произвести такую обработку, то в качестве временной меры можно допустить установку в стыке обеих половин вкладыша прокладок (рис. П12-5), которые вырезают из тонкой листовой стали толщиной 0,1—0,2 мм. Прокладки должны иметь одинаковую толщину по всей длине и не должны закрывать карманов, отверстий для болтов и шпилек, а также для прохода масла.

Необходимо иметь в виду, что при таком способе увеличения верхнего зазора нужно ставить прокладки и в стыки обеих половин корпуса подшипника, что весьма нежелательно и может быть допущено только для временной эксплуатации. Вообще следует по возможности избегать большого числа прокладок.

Боковые (горизонтальные) зазоры во вкладыше увеличивают путем шабровки.

Для уменьшения зазоров необходима, как правило, перезаливка вкладышей. Уменьшить вертикальный зазор при отсутствии прокладок можно, спиливая плоскости разъема верхней и нижней половин вкладыша и пришабривая их по плите с плотностью прилегания порядка двух пятен на 1 см^2.

В таких случаях необходимо ставить между крышкой корпуса подшипника и вкладышем прокладку, обеспечивающую предписанное заводом-изготовителем сопряжение вкладыша с корпусом (обычно зазор около 0,05 мм).

Зазоры в шарико- и роликоподшипниках измеряют при помощи щупа. Для этого пластинку щупа вводят между телами качения и наружным кольцом подшипника в ненагруженной зоне.

Зазоры для валов диаметром до 25, до 100 и свыше 100 мм не должны быть выше соответственно 0,1, 0,2 и 0,3 мм.

Новые шарико- и роликоподшипники имеют для валов диаметром до 100 мм и более 100 мм зазоры соответственно 0,01—0,10 мм и 0,06—0,30 мм.

Чтобы обеспечить нормальную работу машины, между торцами вкладышей подшипников скольжения и уступами (галтелями) вала должны быть определенные зазоры. Эти зазоры также измеряются пластинчатыми щупами.

При работе машины ротор (якорь) под влиянием магнитных сил стремится установиться так, чтобы получилась небольшая магнитная проводимость цепи. Это соответствует такому вза-

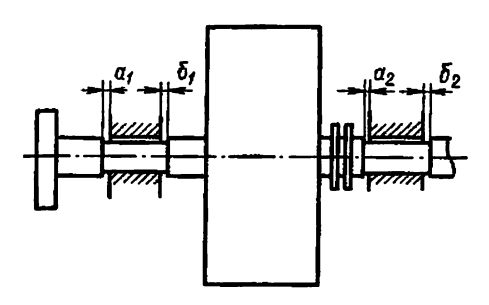


Рис. П12-6. Осевые зазоры между торцами вкладышей подшипников и заточками вала

имному положению ротора и статора, когда совпадают перпендикулярные валу плоскости симметрии активной стали статора и ротора. Если величина осевых зазоров недостаточна, то галтели вала при работе машины могут упираться в торцы вкладышей, вызывая подплавление вкладышей и другие связанные с этим повреждения машины. Поэтому осевые зазоры по обе стороны торцов вкладышей должны быть выбраны с учетом температурного удлинения вала в направлении от муфты к переднему подшипнику (со стороны коллектора или контактных колец). Следовательно, в холодном состоянии нужно устанавливать вал так, чтобы зазоры a_1 и $б_1$ (рис. П12-6) были примерно одинаковыми, а зазор a_2 был больше зазора $б_2$ с тем, чтобы в нагретом состоянии при полной нагрузке эти зазоры были равны друг другу.

В многомашинных агрегатах величину осевых зазоров надо устанавливать в предположении, что температурное удлинение валов происходит от середины агрегата по направлению к крайним подшипникам. Величины осевых зазоров задает завод-изготовитель. При отсутствии этих данных обычно исходят из предположения, что вал удлиняется на 0,5 мм на 1 м длины при повышении его температуры на 40 °С. Для валов крупных машин (при диаметре более 200 мм) разбег ротора в обе стороны от центрального положения составляет ориентировочно 2 % диаметра шейки.

В. ИЗМЕРЕНИЕ БИЕНИЙ

Биение вращающихся частей определяют индикатором часового типа.

Для измерения радиального биения вала индикатор устанавливают на плоскость разъема подшипникового стояка либо на другое жесткое основание (рис. П12-7). Проверяемую окруж-

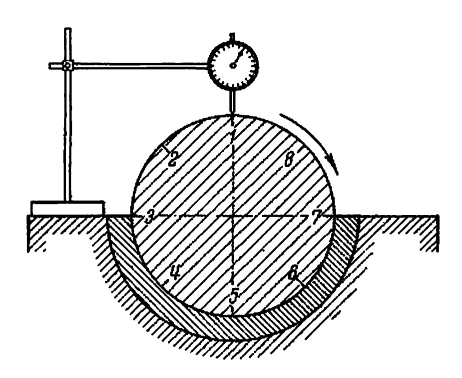


Рис. П12-7. Проверка радиального биения

ность делят на восемь равных частей, измерительный стержень индикатора устанавливают в верхней части проверяемой поверхности, предварительно стрелку его устанавливают на нуль. Поворачивая ротор (вручную или краном), производят запись показаний индикатора при каждом из восьми положений вала. Для более легкого поворачивания ротора шейку вала смазывают маслом. Запись показаний индикатора ведут со знаком «+» или «—» в зависимости от направления отклонения его стрелки. Разница в показаниях индикатора свидетельствует об эксцентричности проверяемой поверхности или искривлении вала.

Величина искривления вала по отношению к его оси равна половине биения. Для получения правильных измерений необходимо перед отсчетом величины биения убедиться в правильной установке индикатора и надежности его закрепления. Для этого перед отсчетом слегка постукивают рукой по индикатору; если после постукивания стрелка индикатора установится в прежнее положение, то это укажет на правильную установку индикатора. Доказательством того, что индикатор не был смещен при измерениях, служит совпадение его показаний при вторичном измерении биения в точке 1 с показаниями при первом измерении в той же точке. Чтобы избежать искажения показаний, надо при каждом измерении ослаблять трос, которым поворачивают ротор; необходимо также проверить плотность установки вкладышей в расточке стояка и убедиться в отсутствии задевания ротора за какие-либо части. Чтобы исключить случайные ошибки, измерения повторяют два-три раза, несколько сдвигая каждый раз индикатор вдоль оси.

Допустимое биение шеек валов составляет 0,02 мм для диаметров 100—200 мм и 0,03 мм для диаметров более 200 м. В местах установки уплотнений биение не должно превы-

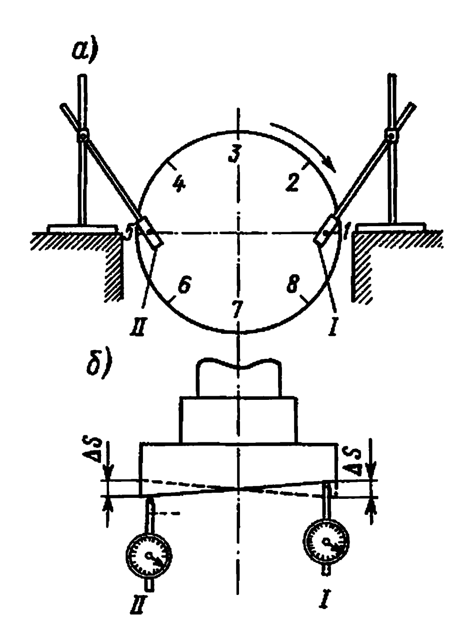


Рис. П12-8. Проверка осевого биения полумуфты

шать 0,05—0,06 мм. Допустимое биение вала ротора в других местах составляет 0,06—0,08 мм для быстроходных машин (3000 об/мин) и 0,10—0,12 мм — для тихоходных.

Осевое биение торца полумуфты проверяют двумя индикаторами, установленными в диаметрально противоположных точках торца полумуфты (рис. П12-8) на одинаковом расстоянии от оси вращения. Применение двух индикаторов исключает ошибки, связанные с возможными осевыми сдвигами ротора в процессе измерений.

Здесь также окружность полумуфты разделяют на четное число равных частей, например на восемь. Измерительные стержни индикатора упирают в торец полумуфты на расстоянии 10—15 мм от края. Биение торца полумуфты определяют на основании восьми пар показаний индикаторов соответственно восьми различным положениям ротора. Для нахождения величины биения торца полумуфты на каком-либо диаметре определяют сумму показаний обоих индикаторов для одной и той же точки торца муфты при двух положениях вала — до и после поворота его на 180°.

Если при первоначальном положении ротора показание индикатора *I* в точке *1* будет I_1, показание индикатора *II* в точ-

Таблица П12-4

Номер точки, (рис. П12-8, *а*)	Показания индикатора, мм		Сумма показаний индикаторов, мм
	I	*II*	
1	0,00	0,00	0,00
2	+0,01	−0,02	−0,01
3	−0,03	+0,01	−0,02
4	+0,05	+0,02	+0,07
5	+0,08	0,00	+0,08
6	+0,04	−0,01	+0,03
7	+0,05	−0,07	−0,02
8	+0,04	−0,01	+0,03
Биение по диаметрам, мм			
1—5	2—6	3—7	4—8
−0,04	−0,02	0,00	+0,02

ке *5* составит II_5, а при повороте ротора на 180° (см. штриховую линию на рис. П12-8, *б*) показания индикаторов будут соответственно равны I_5 и II_1, то биение Δs торца полумуфты на диаметре 1—5 определится по формуле

$$\Delta s = \frac{(I_1 + II_1) - (I_5 + II_5)}{2}.$$

Значения I_1, II_1, I_5 и II_5 в формуле имеют знак «+» при отклонении стержня индикатора в сторону индикатора и знак «—» при отклонении стержня в сторону муфты.

Положительное значение Δs указывает на то, что точка *1* по отношению к точке *5* выступает в сторону индикатора. Если индикаторы установлены на различном расстоянии от оси вращения,.то биение следует отнести к расстоянию между измерительными стержнями индикаторов.

Результаты измерений и подсчетов рекомендуется представить в табличной форме по образцу табл. П12-4.

Как видно из примера, приведенного в табл. П12-4, наибольшее биение будет на диаметре 1—5 в точке *5*.

Чтобы исключить случайные ошибки, измерения повторяют два-три раза, смещая каждый раз индикаторы ближе к центру на 5—10 мм. Кроме того, чтобы проверить отсутствие смещения индикаторов при измерениях, ротор устанавливают в первоначальное положение *(1—5)* и производят повторно два измерения; разность между показаниями индикаторов при отсутствии их смещения должна равняться первоначальной разности.

Допускаемые радиальное и осевое биения составляют: для жестких муфт 0,03—0,04 мм, для полужестких — не более 0,06 мм. Для жестких муфт быстроходных машин, например турбогенераторов, осевое биение не должно превышать 0,02—0,03 мм.

Биение коллектора проверяют при медленном проворачивании якоря. Наличие промежутков между пластинами весьма затрудняет измерение биения коллектора при обычной форме конца измерительного стержня. Для устранения этого недостатка на конец стержня индикатора надевают плоский наконечник.

Допустимое биение коллекторов быстроходных машин с окружной скоростью коллектора до 50 м/с, например турбовозбудителей, не должно превышать 0,02—0,03 мм, в тихоходных машинах может быть допущено без ущерба для работы машины значительно большее биение.

Г. ИЗМЕРЕНИЕ И НОРМЫ ВИБРАЦИЙ

Роторы всех вращающихся электрических машин обязательно балансируются (см. приложение 14) на заводах-изготовителях, после чего, однако, в них остается некоторая неуравновешенность.

По ГОСТ 12327—79, распространяющемуся на машины *с жесткими* (см. приложение 14) роторами массой 0,01—1000 кг и рабочей частотой вращения до 30 000 об/мин, в зависимости от массы роторы делятся на три группы: с массой 0,01—1 кг *(микророторы)*, свыше 1 до 3 кг *(малые роторы)* и свыше 3 до 1000 кг *(средние роторы)*. Этот стандарт не распространяется на автотракторные электрические машины.

Для роторов электрических машин устанавливаются четыре класса точности балансировки роторов, указанные ниже:

Класс точности балансировки	6,3	2,5	1,0	0,4
Наибольшие допустимые значения произведения $e\omega$, мм·рад/с	6,3	2,5	1,0	0,4

Для средних роторов следует использовать классы точности балансировки 6,3; 2,5 и 1,0, для малых роторов и микророторов — классы 2,5; 1,0 и 0,4.

Этим стандартом устанавливаются рекомендации по выбору классов точности и технологии балансировки, а также допустимые остаточные дисбалансы для роторов указанных групп (см. приложение 14).

До создания единого государственного стандарта на нормы вибрации электрических машин нужно руководствоваться нор-

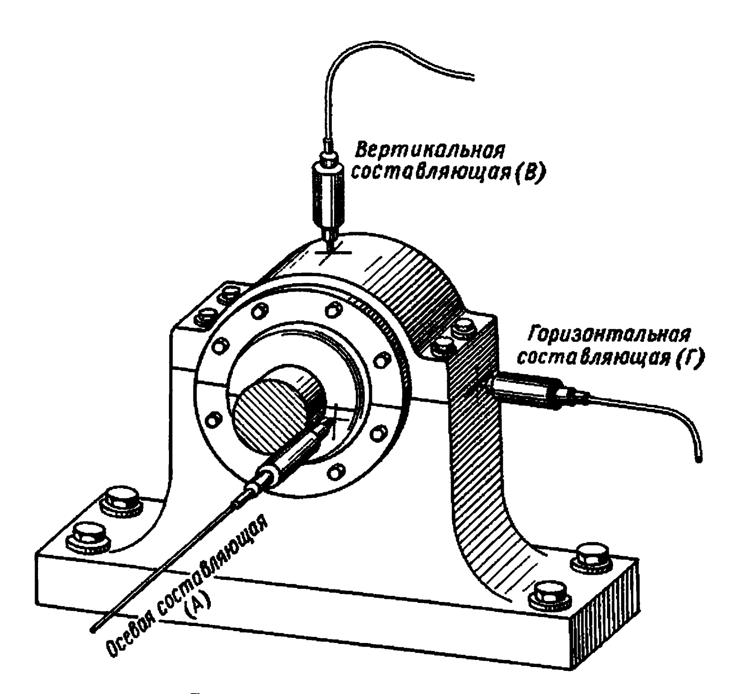


Рис. П12-9. Вибрация подшипника

мами, установленными в стандартах на машины соответствующих типов или, при отсутствии таких норм, временными нормами, принятыми на заводах-изготовителях электрических машин.

При оценке вибрации электрической машины в соответствии с ГОСТ 12379—75 основной измеряемой величиной должно являться среднее квадратическое значение виброскорости v_e.

Вибрационное смещение, скорость и ускорение подшипников измеряют вибрографами или виброметрами в трех взаимно перпендикулярных направлениях: а) вертикальном — на крышке, над осью вращения ротора; б) горизонтальном — по разъему против середины вкладыша и в) осевом — по разъему, по возможности ближе к оси вращения (рис. П12-9).

При частоте вращения вала менее 500 об/мин можно измерять размах вибрационного смещения индикатором часового типа.

В ГОСТ 16921—83, распространяющемся на вращающиеся электрические машины с массой 0,5—2000 кг и рабочей частотой вращения 600—12 000 об/мин, в качестве оцениваемого параметра вибрации принимается максимальное из средних квадратических значений вибрационной скорости v_e, измеренных

для диапазона от частоты, соответствующей рабочей частоте вращения, до 2000 Гц.

Для оценки вибрации собранных машин при выпуске с предприятия-изготовителя устанавливается восемь классов по величине вибрации машин. Индексы этих классов обозначаются числами: 0,28; 0,45; 0,7; 1,1; 1,8; 2,8; 4,5; 7,0. Каждое из чисел равно наибольшему допустимому эффективному значению вибрационной скорости в миллиметрах в секунду для машин данного класса.

Параметры вибрации этих машин должны измеряться при типовых или контрольных испытаниях на предприятиях-изготовителях по ГОСТ 12379—75 в соответствии с программой испытаний, установленной в стандартах или технических условиях на машины соответствующих типов.

До настоящего времени, помимо ГОСТ 16921—83 (для машин с массой до 2000 кг), государственные стандарты устанавливают нормы допустимых вибраций только для синхронных компенсаторов, турбогенераторов и гидрогенераторов.

Допускаемая вибрация (среднее квадратическое значение скорости вибрации) подшипников синхронных компенсаторов (ГОСТ 609—84) на уровне оси вала при всех режимах работы и при номинальной частоте вращения не должна превышать 2,2 мм/с; допускаемая вибрация сердечника статора на частоте 100 Гц и при симметричной нагрузке не должна превышать 9,5 мм/с.

Вибрация (эффективное значение вибрационной скорости) подшипников турбогенераторов при всех режимах работы, предусмотренных ГОСТ 533—85 Е, должна соответствовать требованиям ГОСТ 25364—82 при номинальной частоте вращения. Нормы вибрации сердечника статора, лобовых частей обмоток и контактных колец устанавливаются в технических условиях на турбогенераторы конкретных типов.

Для гидрогенераторов (ГОСТ 5616—81 Е) допускаемая вибрация в горизонтальной плоскости крестовин гидрогенератора со встроенными в них направляющими подшипниками при вертикальном исполнении или вибрация подшипников при горизонтальном исполнении гидрогенератора во всех режимах работы при номинальной частоте вращения должна быть не более: 180 мкм для генераторов с номинальной частотой вращения до 100 об/мин; 150 мкм — свыше 100 до 187,5 об/мин; 100 мкм — свыше 187,5 до 375 об/мин; 70 мкм — свыше 375 до 750 об/мин.

Допускаемая вибрация (размах колебаний) сердечника статора при частоте 100 Гц при нагрузках в симметричных режимах не должна превышать 30 мкм.

В осевом направлении гидрогенератор должен выдерживать вибрации гидравлической турбины не более указанных выше.

В качестве примера применяемых внутризаводских норм ниже приводятся установленные ЛПЭО «Электросила» (нормали 8Р11 и 8Р15) наибольшие допустимые размахи **полигармонической** вибрации подшипников электрических машин постоянного и переменного тока, а также агрегатов, за исключением турбогенераторов, при приемных испытаниях на стендах выпускающих цехов:

Номинальная частота вращения ротора (якоря), об/мин	375	500	600	750	1000	1500	3000	4500	6000
Наибольший размах вибрации, мкм	90	85	80	75	70	60	40	30	25

Эти нормы распространяются на любой режим работы, предусмотренный для машины.

Если изготовляется машина с частотой вращения, выходящей за пределы указанного диапазона, а также в случаях, когда машина должна удовлетворять более жестким требованиям, то заводом устанавливаются для этой машины индивидуальные нормы допустимой вибрации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ УСТАНОВКИ ВАЛОВ. ЦЕНТРОВКА

А. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Соединяемые между собой машины будут правильно работать в том случае, если их валы будут установлены так, чтобы упругие линии валов являлись продолжением одна другой без смещения и излома в плоскости сопряжения. Установка валов в соответствии с этими требованиями в практике получила название центровки.

Естественный прогиб валов вызывает необходимость устанавливать их с определенным уклоном к горизонту.

Установку валов можно выполнить двумя способами. По первому способу подшипники должны быть установлены так, чтобы шейки валов по обе стороны муфты были горизонтальны (рис. П13-1, *а*) и уровень, установленный на шейках *2* и *3* валов

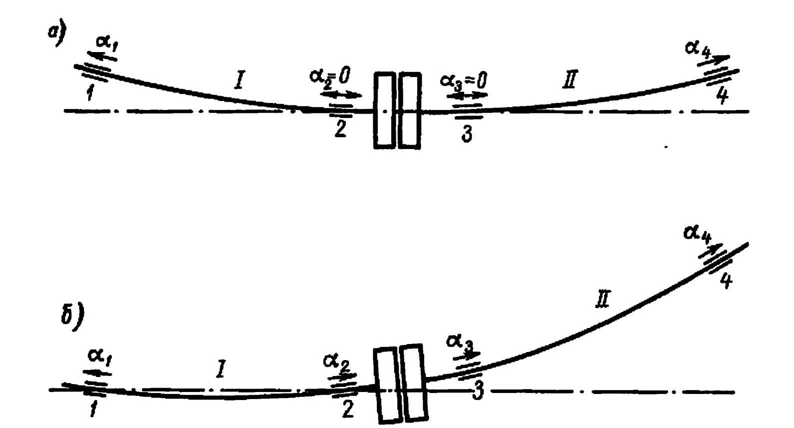


Рис. П13-1. Различные способы установки линии валов двухмашинного агрегата

I и *II*, давал нулевые показания, т. е. $\alpha_2=\alpha_3=0$; в этом случае шейки *1* и *4* будут иметь некоторый подъем, величина которого будет зависеть от характера упругой линии валов.

По второму способу вал *I* одной из машин (рис. П13-1, *б*) устанавливают горизонтально. При этом уровень, установленный на шейках *1* и *2* вала, дает показания (α_1 и α_2), одинаковые по величине, но обратные по знаку, а уровень, установленный на шейке *3*, должен дать такие же показания, что и на шейке *2*, т. е. $\alpha_2=\alpha_3$; шейка *4* имеет подъем. При значительной величине подъема этого конца вала горизонтальная составляющая веса ротора машины *II* при работе агрегата будет нажимать на подшипник машины *I*. Учитывая этот недостаток, обычно установку валов производят по первому способу.

Устанавливая линии валов многомашинных агрегатов, как правило, стремятся к тому, чтобы подъем крайних подшипников агрегата был по возможности одинаковым, причем самый тяжелый ротор агрегата обычно располагают горизонтально.

Уклон шейки вала измеряют уровнем при четырех положениях вала, поворачивая последний каждый раз на 90°, причем в каждом положении делают два измерения; при втором измерении уровень поворачивают на 180°. За величину уклона принимают среднеарифметическое значение восьми показаний. Такое определение уклона шеек валов необходимо во избежание ошибки, могущей получиться в результате искривления вала ротора или отклонения оси шейки от оси вращения (о таких дефектах могут свидетельствовать значительные изменения показаний

уровня, установленного на шейке вала, при различных положениях ротора).

Для проверки установки валов агрегата, находящегося в эксплуатации, необходимо снять все крышки подшипников и проверить уровнем уклоны всех шеек валов. Цена деления применяемых для этого уровней соответствует обычно подъему 0,1 мм на 1 м. Отсутствие изменений в уклонах при сравнении полученных данных с данными монтажного формуляра указывает на сохранение центровки. Если же обнаружатся расхождения в величинах или в направлениях уклонов, то необходимо проверить центровку агрегата.

Если при изменении уклонов шеек центровка не нарушена, то имеет место неравномерная осадка фундамента.

Методы проверки центровки зависят от того, являются ли роторы двухопорными, т. е. имеют два подшипника, или одноопорными (один конец вала установлен на подшипник, а второй соединен с другой машиной при помощи жесткой муфты).

Б. ПРОВЕРКА ЦЕНТРОВКИ ДВУХОПОРНЫХ РОТОРОВ

1. Проверка центровки при помощи одной пары скоб. Проверка центровки роторов при помощи скоб (рейсмусов) основана на следующем.

Если на каждую из полумуфт соединяемых роторов укрепить по рейсмусу (рис. П13-2), каждый из которых имеет по два острия, причем одно направлено горизонтально, а второе — вертикально, то при повороте каждого из валов острия каждого из рейсмусов будут описывать окружности, перпендикулярные оси вращения вала, на котором рейсмус закреплен. Если установить острия соответствующих рейсмусов друг против друга и производить совместный поворот валов, то величины радиальных *a* и осевых *b* зазоров между остриями рейсмусов будут зависеть только от взаимного положения осей вращения, но не будут зависеть от неправильной обработки цилиндрических поверхностей и торцов полумуфт, а также от искривлений валов; **при этом предполагается отсутствие осевых сдвигов роторов при их повороте**. Взаимное положение осей вращения обоих валов может быть определено на основании измерений указанных радиальных и осевых зазоров при четырех положениях роторов (при совместном их повороте), отличающихся друг от друга на 90°.

При правильной установке валов все зазоры *a* и зазоры *b* (рис. П13-2) при каждом из четырех положений валов будут равны между собой (о допустимых отклонениях см. п. 4 этого раздела).

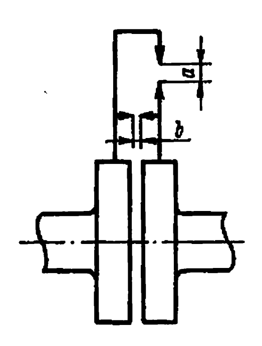


Рис. П13-2. Установка рейсмусов на полумуфтах

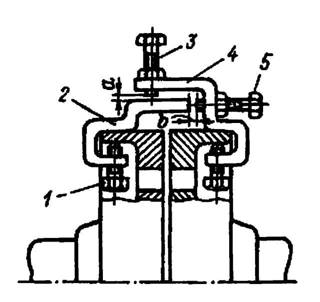


Рис. П13-3. Приспособление для центровки, укрепленное на ободах полумуфт

Для измерения радиальных и осевых зазоров применяют приспособления различных конструкций, укрепляемых на полумуфтах или на валах вблизи полумуфт. На рис. П13-3 показано такое приспособление для центровки, состоящее из двух стальных скоб *2* и *4*, укрепленных при помощи болтов *1* на полумуфтах окончательно установленной и прицентровываемой машины. Скобы устанавливают друг против друга с тем, чтобы можно было одновременно производить измерения радиальных *a* и осевых *b* зазоров щупом при различных положениях роторов. Для измерений и регулировки величины этих зазоров при установке скоб служат болты *3* и *5* с контргайками.

Все эти приспособления должны обладать достаточной жесткостью для того, чтобы они не прогибались при выполнении измерений щупом и под действием собственного веса. Для повышения точности измерений зазоров можно вместо измерительных болтов установить индикаторы (рис. П13-4, *а*) или микрометрические головки (рис. П13-4, *б*), укрепляемые на скобах винтами.

Перед установкой приспособлений для центровки полумуфты должны быть разъединены, все болты вынуты, роторы несколько раздвинуты, чтобы не было касаний между полумуфтами. Затем проверяют свободное проворачивание каждого из роторов и убеждаются в отсутствии каких-либо задеваний, например в уплотнениях щитов корпуса машины; проверяют также наличие разбега ротора.

Чтобы предотвратить осевые перемещения роторов, необходимо установить надежные упоры в заточки или в торцы валов. Устанавливают роторы так, чтобы риски на обеих полумуфтах совпадали, укрепляют центровочное приспособление и устанав-

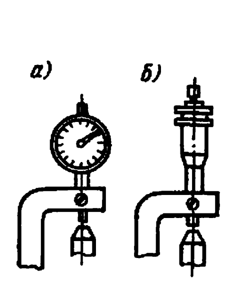


Рис. П13-4. Измерение зазоров: *а* — индикатором; *б* — микрометрической головкой

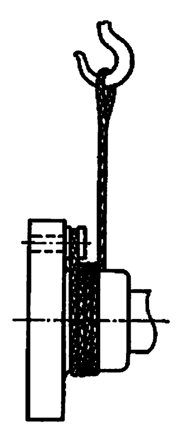


Рис. П13-5. Поворачивание ротора краном

ливают его так, чтобы при измерении можно было пользоваться минимальным числом пластин щупа. При этом измерения более точны; желательно, чтобы первоначальные зазоры составляли не более 2—3 мм. Внешнюю скобу устанавливают на полумуфте выверенной машины. После установки приспособлений обязательна проверка надежности их закрепления. При измерениях необходимо периодически убеждаться в том, что все скобы не касаются каких-либо частей машины; не следует также касаться скоб руками.

Для измерения радиальных и осевых зазоров оба ротора одновременно поворачивают от исходного положения (0°) на 90°, 180° и 270° в направлении вращения приводного двигателя или механизма и щупом измеряют зазоры в каждом из этих четырех положений и при совпадении рисок.

При измерениях следует пластины щупа заводить с легким усилием. Чтобы измерения были более точными, их должно производить одно лицо.

Легкие роторы можно поворачивать вручную или рычагом, тяжелые приходится поворачивать краном. В последнем случае в одно из отверстий муфты вставляют палец (рис. П13-5), на котором укрепляют один конец стропа; последний несколько раз обертывается вокруг ступицы муфты. Второй конец стропа надевают петлей на крюк крана. При каждом измерении зазоров трос должен быть ослаблен.

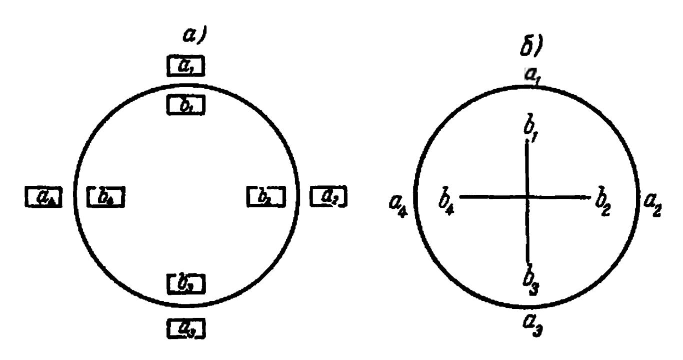


Рис. П13-6. Запись результатов измерений при центровке ротора одной парой скоб

Результаты измерений радиальных и осевых зазоров записываются, как указано на рис. П13-6, *а* или, более упрощенно, на рис. П13-6, *б*, где a_1, a_2, a_3, a_4 и b_1, b_2, b_3, b_4 — соответственно радиальные и осевые зазоры при углах поворота валов на 0°, 90°, 180° и 270°. Такой порядок записи принимается условно, если смотреть на торец полумуфты прицентровываемой машины со стороны установленной машины.

Критерием правильно произведенных измерений зазоров является соблюдение следующих равенств:

$$a_1+a_3=a_2+a_4;\quad b_1+b_3=b_2+b_4,$$

т. е. сумма радиальных, а также и осевых зазоров по двум взаимно перпендикулярным диаметрам должна быть одинакова. Кроме этого, для контроля правильности измерений следует после четырех пар измерений вновь установить роторы в первоначальное положение (0°); измерения в этом положении должны совпадать с первоначальными в этой точке.

Причинами неправильных измерений могут служить недостаточная жесткость установки центровочного приспособления, неодинаковые усилия при заводке пластин щупа в зазоры, а также осевой сдвиг роторов в процессе измерений. При значительных отклонениях измерений (более 0,02 мм), обнаруженных этими проверками, необходимо устранить вызвавшие их причины и снова повторить измерения.

Если не представляется возможным произвести измерения при нижнем положении приспособления (зазоры a_3 и b_3), то выполняют измерения при трех положениях скоб, а недостающее измерение заменяют расчетом; радиальные и осевые зазоры внизу определяют из выражений:

$$a_3=(a_2+a_4)-a_1; \quad b_3=(b_2+b_4)-b_1.$$

Необходимые перемещения подшипников прицентровываемой машины производят на основании измерений осевых и радиальных зазоров по формулам:

$$y_1=\frac{a_1-a_3}{2}+\frac{b_1-b_3}{2}\frac{l_1}{r}; \quad \text{(П13-1)}$$

$$y_2=\frac{a_1-a_3}{2}+\frac{b_1-b_3}{2}\frac{l_2}{r}; \quad \text{(П13-2)}$$

$$x_1=\frac{a_2-a_4}{2}+\frac{b_2-b_4}{2}\frac{l_1}{r}; \quad \text{(П13-3)}$$

$$x_2=\frac{a_2-a_4}{2}+\frac{b_2-b_4}{2}\frac{l_2}{r}, \quad \text{(П13-4)}$$

где x_1 и y_1 — горизонтальное и вертикальное перемещения подшипника, ближайшего к муфте; x_2 и y_2 — горизонтальное и вертикальное перемещения второго подшипника.

Положительные значения величин x_1 и x_2 соответствуют перемещению вправо, а отрицательные — влево; положительные значения величин y_1 и y_2 соответствуют перемещению вверх, а отрицательные — вниз. Все указанные направления перемещений справедливы только в том случае, если при измерениях и при записи их результатов соблюдены следующие положения:

а) расположение буквенных обозначений на рис. П13-6 соответствует торцу полумуфты прицентровываемой машины, если смотреть на этот торец со стороны окончательно установленной машины;

б) охватывающая скоба установлена на полумуфте окончательно установленной машины;

в) независимо от принятого направления поворота ротора в процессе центровки отсчеты a_1 и b_1 находятся сверху, а b_2 — справа.

В формулах (П13-1) — (П13-4): l_1 — расстояние от середины подшипника *1* до торца полумуфты (рис. П13-7, *а*); l_2 — расстояние от середины подшипника *2* до торца полумуфты; r — радиус скобы, отнесенный к точке измерений осевого зазора.

П р и м е р. Пусть вал прицентровываемой машины и скоба для измерения осевых зазоров имеют размеры, показанные на рис. П13-7, *а*, т. е. $l_1=350$ мм, $l_2=2000$ мм, $r=400$ мм. При измерении радиальных и осевых зазоров получены данные, приведенные на рис. П13-7, *б*, что соответствует расположению

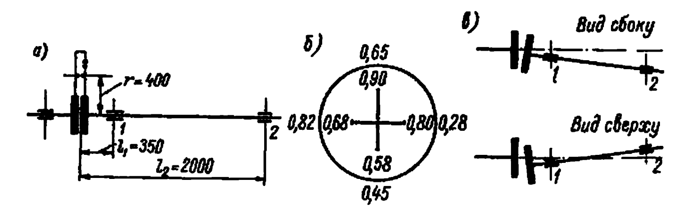


Рис. П13-7. Пример центровки роторов при помощи одной пары скоб

валов, показанному на рис. П13-7, *в*; внешняя скоба установлена на полумуфте выверенной машины.

Пользуясь формулами (П13-1) — (П13-4), получим

$$y_1 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2}\frac{l_1}{r} =$$

$$= \frac{0{,}65 - 0{,}45}{2} + \frac{0{,}90 - 0{,}58}{2}\frac{350}{400} = 0{,}24 \text{ мм};$$

$$y_2 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2}\frac{l_2}{r} =$$

$$= \frac{0{,}65 - 0{,}45}{2} + \frac{0{,}90 - 0{,}58}{2}\frac{2000}{400} = 0{,}90 \text{ мм};$$

$$x_1 = \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_2 - b_4}{2}\frac{l_1}{r} =$$

$$= \frac{0{,}28 - 0{,}82}{2} + \frac{0{,}80 - 0{,}68}{2}\frac{350}{400} = -0{,}22 \text{ мм};$$

$$x_2 = \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_2 - b_4}{2}\frac{l_2}{r} =$$

$$= \frac{0{,}28 - 0{,}82}{2} + \frac{0{,}80 - 0{,}68}{2}\frac{2000}{400} = 0{,}03 \text{ мм}.$$

Следовательно, подшипник *1* необходимо поднять вверх на 0,24 мм и передвинуть влево на 0,22 мм (знак «—»), а подшипник *2* поднять вверх на 0,90 мм и передвинуть вправо на 0,03 мм.

2. Проверка центровки при помощи двух пар скоб. При проверке центровки одной парой скоб, как это было указано ранее, необходимо предотвратить осевые перемещения валов, искажающие результаты центровки. Для предотвращения влия-

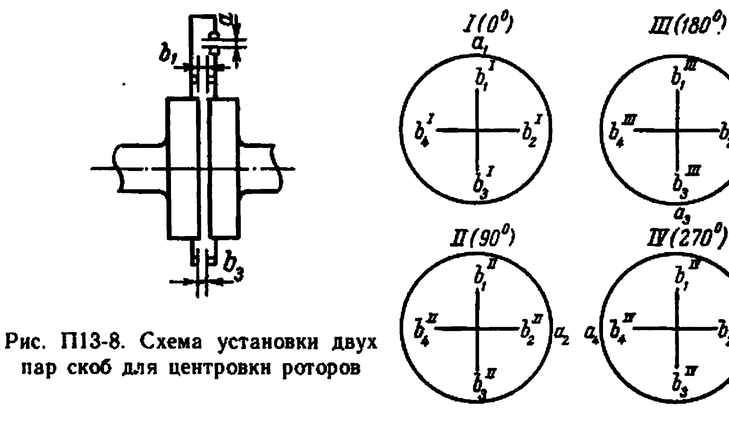


Рис. П13-8. Схема установки двух пар скоб для центровки роторов

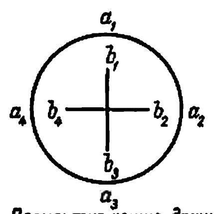


Рис. П13-9. Запись результатов измерений при центровке роторов с помощью двух пар скоб

ния осевых сдвигов роторов центровку можно производить при помощи двух пар скоб (рис. П13-8), расположенных относительно друг друга на 180°.

Одной парой скоб измеряют радиальные и осевые зазоры, а другой — только осевые. Обе пары скоб должны измерять осевые зазоры на одинаковом радиусе.

Измерения зазоров по этому способу производятся также при последовательном совместном повороте обоих роторов на 0° 90°, 180° и 270°. При каждом положении измеряют один радиальный зазор и два осевых. Методика измерений во всем соответствует изложенному для случая центровки одной парой скоб.

Запись измерений в четырех положениях показана на рис. П13-9. На основании этих записей определяются результирующие осевые зазоры в четырех точках окружности. Результирующий осевой зазор принимается равным полусумме зазоров, измеренных в данной точке при одном положении скоб и при положении, повернутом на 180°, т. е.

$$b_1 = \frac{b_1^{I} + b_1^{III}}{2}; \quad b_2 = \frac{b_2^{II} + b_2^{IV}}{2};$$

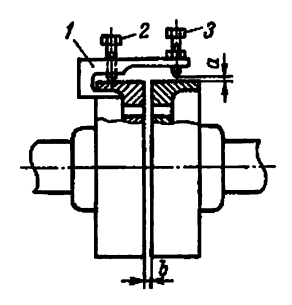


Рис. П13-10. Скоба для центровки роторов по полумуфтам

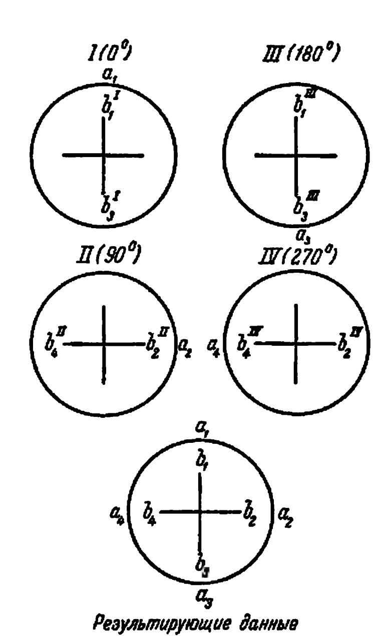


Рис. П13-11. Запись результатов измерений при центровке по полумуфтам

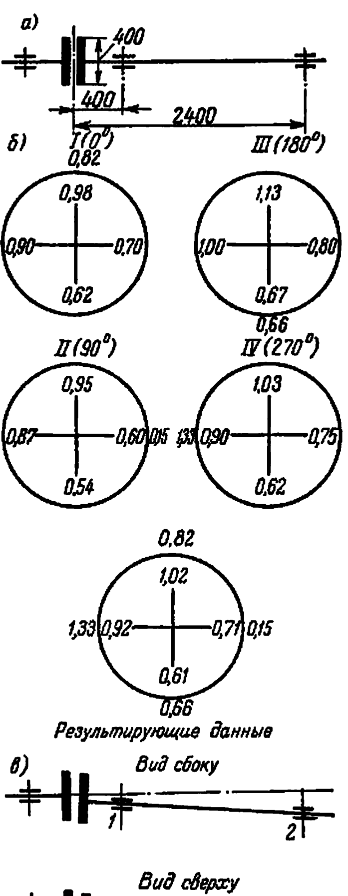
$$b_3=\frac{b_3^{I}+b_3^{III}}{2}; \quad b_4=\frac{b_4^{II}+b_4^{IV}}{2}.$$

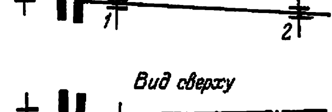
Такой способ определения результирующих зазоров исключает влияние неодинаковости величин осевых зазоров обеих пар скоб при их закреплении, а также и возможных осевых сдвигов ротора при его поворотах. Это объясняется тем, что эти величины войдут в результирующие зазоры каждой точки в виде постоянных величин, которые исключаются вследствие того, что при определении перекоса линии валов берутся разности результирующих зазоров.

На основании результирующих данных измерения зазоров определяют необходимые перемещения подшипников по формулам (П13-1) — (П13-4), подставляя в них вместо b_1, b_2, b_3 и b_4 результирующие осевые зазоры.

3. Проверка центровки по полумуфтам. При проверке центровки по этому способу для измерения радиальных зазоров применяют скобу, одна из конструкций которой показана на рис. П13-10. Скобу *1* прикрепляют к полумуфте установленного ротора при помощи болта *2*. В скобу ввертывают измерительный болт *3* с контргайкой. Радиальные зазоры *a* измеряют щупом между измерительным болтом и внешней окружностью полу-

Рис. П13-12. Пример центровки роторов по полумуфтам





муфты. Здесь вместо измерительного болта может применяться и индикатор. Осевые зазоры измеряют при помощи щупа между торцами полумуфт. Следует указать, что в некоторых конструкциях муфт предусматриваются контрольные заточки на цилиндрической поверхности и на торце.

Если расстояние между торцами полумуфт больше, чем это можно измерить набором пластин щупа, то осевые зазоры измеряют щупом и дополнительной калибровочой пластинкой.

Измерения зазоров производятся также при установке обоих роторов в четырех положениях (0°, 90°, 180° и 270°). При каждом положении измеряется один радиальный зазор и четыре осевых.

Осевые зазоры измеряются при каждом положении полумуфт в четырех точках по концам двух взаимно перпендикулярных диаметров; запись результатов измерений ведется, как указано на рис. П13-11. На основании этих записей определяются результирующие зазоры, принимаемые равными средней величине зазора в данной точке, т. е.

$$b_1=\frac{b_1^{\mathrm{I}}+b_1^{\mathrm{II}}+b_1^{\mathrm{III}}+b_1^{\mathrm{IV}}}{4};\qquad b_2=\frac{b_2^{\mathrm{I}}+b_2^{\mathrm{II}}+b_2^{\mathrm{III}}+b_2^{\mathrm{IV}}}{4};$$

$$b_3=\frac{b_3^{\mathrm{I}}+b_3^{\mathrm{II}}+b_3^{\mathrm{III}}+b_3^{\mathrm{IV}}}{4};\qquad b_4=\frac{b_4^{\mathrm{I}}+b_4^{\mathrm{II}}+b_4^{\mathrm{III}}+b_4^{\mathrm{IV}}}{4}.$$

И при этом методе исключается, конечно, влияние на результаты центровки осевых сдвигов роторов, которые возможны в процессе центровки.

Как было указано, критерием правильности произведенных измерений осевых зазоров является равенство суммы осевых зазоров по горизонтальному диаметру сумме этих же зазоров по вертикальному диаметру. Это справедливо также по отношению к результирующим осевым и радиальным зазорам.

Если при рассматриваемом способе центровки окажется невозможным произвести измерения в одной из точек, то можно, так же как это было указано выше, произвести измерения в трех точках, а величины зазоров в четвертой точке определить расчетом.

Для определения перемещений подшипников пользуются формулами (П13-1) — (П13-4), подставляя в них вместо b_1, b_2, b_3 и b_4 величины результирующих зазоров.

Пример. Пусть расстояния l_1 и l_2 (рис. П13-12, *а*) равны соответственно 400 мм и 2400 мм, диаметр муфты равен 400 мм, т. е. $r=200$ мм; при измерении радиальных и осевых зазоров получены данные, представленные на рис. П13-12, *б*. Требуется рассчитать перемещения подшипников для правильной установки роторов.

Определим результирующие осевые зазоры:

$$b_1=\frac{b_1^{I}+b_1^{II}+b_1^{III}+b_1^{IV}}{4}=$$

$$=\frac{0{,}98+0{,}95+1{,}13+1{,}03}{4}=1{,}02 \text{ мм};$$

$$b_2=\frac{b_2^{I}+b_2^{II}+b_2^{III}+b_2^{IV}}{4}=$$

$$=\frac{0{,}70+0{,}60+0{,}80+0{,}75}{4}=0{,}71 \text{ мм};$$

$$b_3=\frac{b_3^{I}+b_3^{II}+b_3^{III}+b_3^{IV}}{4}=$$

$$=\frac{0{,}62+0{,}54+0{,}67+0{,}62}{4}=0{,}61 \text{ мм};$$

$$b_4=\frac{b_4^{I}+b_4^{II}+b_4^{III}+b_4^{IV}}{4}=$$

$$=\frac{0{,}90+0{,}87+1{,}00+0{,}90}{4}=0{,}92\ \text{мм}.$$

Результирующие осевые и радиальные зазоры показаны внизу рис. П13-12, *б*. Необходимое перемещение подшипников определим по формулам (П13-1) — (П13-4) на основании результирующих данных.

Вертикальное перемещение подшипника *1*

$$y_1=\frac{a_1-a_3}{2}+\frac{b_1-b_3}{2}\,\frac{l_1}{r}=$$

$$=\frac{0{,}82-0{,}66}{2}+\frac{1{,}02-0{,}61}{2}\,\frac{400}{200}=0{,}49\ \text{мм}.$$

Горизонтальное перемещение подшипника *1*

$$x_1=\frac{a_2-a_4}{2}+\frac{b_2-b_4}{2}\,\frac{l_1}{r}=$$

$$=\frac{0{,}15-1{,}33}{2}+\frac{0{,}71-0{,}92}{2}\,\frac{400}{200}=-0{,}80\ \text{мм}.$$

Вертикальное перемещение подшипника *2*

$$y_2=\frac{a_1-a_3}{2}+\frac{b_1-b_3}{2}\,\frac{l_2}{r}=$$

$$=\frac{0{,}82-0{,}66}{2}+\frac{1{,}02-0{,}61}{2}\,\frac{2400}{200}=2{,}54\ \text{мм}.$$

Горизонтальное перемещение подшипника *2*

$$x_2=\frac{a_2-a_4}{2}+\frac{b_2-b_4}{2}\,\frac{l_2}{r}=$$

$$=\frac{0{,}15-1{,}33}{2}+\frac{0{,}71-0{,}92}{2}\,\frac{2400}{200}=-1{,}85\ \text{мм}.$$

Таким образом, подшипник *1* нужно поднять вверх на 0,49 мм и передвинуть влево на 0,80 мм, а подшипник *2* необходимо поднять вверх на 2,48 мм и передвинуть влево на 1,85 мм. Фактическое положение валов показано на рис. П13-12, *в*. Нетрудно убедиться в том, что если в качестве результирующих зазоров принять результирующие зазоры для положений 0° и 180° или 90° и 270°, то получим те же перемещения подшипников.

4. Допуски на центровку. Если центровка производится скобами, то при совместном повороте обоих роторов на 0°, 90°

Таблица П13-1

Тип соединительной муфты	Разность средних величин зазоров, мм		Примечание
	по окружности (радиальные зазоры)	по торцу (осевые зазоры, приведенные к диаметру 1 м)	
Жесткая	0,04	0,05	Допускаемые отклонения необходимо согласовывать с данными завода — поставщика турбины
Полужесткая	0,06	0,06	
Пружинная	0,06	0,06	
Кулачковая	0,08	0,08	

180° и 270° и при радиусе измерений осевых зазоров 250—300 мм величины радиальных, а также осевых зазоров не должны отличаться друг от друга более чем на 0,03 мм. При другом радиусе измерений допуски на осевые зазоры должны быть изменены пропорционально радиусам.

При центровке по полумуфтам радиальные, а также осевые зазоры при тех же положениях валов и при муфтах диаметром 400—500 мм не должны отличаться друг от друга больше чем на 0,05 мм.

Допуски на центровку турбогенераторов по полумуфтам приведены в табл. П13-1.

В. ПРОВЕРКА ЦЕНТРОВКИ ОДНООПОРНЫХ РОТОРОВ

Проверку правильности центровки одноопорных роторов производят следующим образом.

Конец вала одноопорного ротора *1* вблизи подшипника подвешивают стропом с винтовой стяжкой *2* (рис. П13-13); под строп предварительно устанавливают подкладку *3* из изогнутого листа латуни (или меди), смазанного цилиндровым маслом. На шейку вала устанавливают два индикатора: один — в вертикальной плоскости, а другой — в горизонтальной, прикрепив их к подшипнику (по месту), и замечают до натяжения стропа показания индикатора, установленного в вертикальной плоскости. После этого приподнимают конец вала настолько, чтобы можно было извлечь нижний вкладыш. Затем конец вала опускают и устанавливают при помощи винтовой стяжки в прежнее положение; индикатор, установленный в вертикальной плоскости, должен дать прежнее показание. После опускания

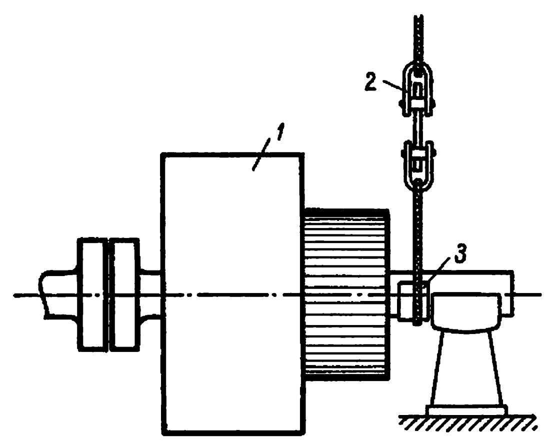


Рис. П13-13. Проверка правильности центровки одноопорного ротора

ротора рекомендуется выждать несколько минут, пока показание индикатора не установится. Ротор поворачивают и определяют величину биения конца вала по индикатору, установленному в горизонтальной плоскости. Полученное биение сравнивают с данными монтажного формуляра. При отсутствии этих данных можно пользоваться следующими допусками на биение свободно подвешенного конца вала:

Частота вращения, об/мин	до 1000	1000—1500	1500—3000
Допуск на биение, мм	0,15—0,20	0,12—0,15	0,05—0,08

Если биение превосходит величины, указанные в формуляре или приведенные выше, то исправляют центровку.

Для этого разъединяют муфту и раздвигают роторы так, чтобы между торцами образовался зазор 1—2 мм; при этом выступ одной из полумуфт должен находиться в выточке другой полумуфты. Таким образом, прицентровываемый ротор одним концом опирается на свой подшипник, а вторым — на поясок полумуфты. Обе полумуфты соединяют двумя-тремя болтами или шпильками диаметром, несколько меньшим, чем диаметр болтов муфты. Это необходимо для того, чтобы, во-первых, предотвратить выпадение ротора из заточки полумуфты и, во-вторых, обеспечить некоторую свободу перемещения роторов.

Во избежание возможных случайностей под свободный конец вала ротора устанавливают надежную опору с некоторым зазором между ней и валом. Затем производят прицентровку по полумуфтам, как это было описано для двухопорного ротора, но

с той разницей, что здесь измеряют только осевые зазоры (без радиальных). Сопряжение выступа и выточки в полумуфтах выполняют по скользящей посадке, разность же диаметров выточки и выступа имеет величину одного порядка с допусками на радиальные зазоры при центровке.

На основании измерений осевых зазоров определяют необходимые перемещения подшипника прицентровываемого ротора, пользуясь формулами, приведенными для случая центровки двухопорных роторов. При подсчете вертикального перемещения подшипника в расчетную формулу может быть внесена поправка, учитывающая, что подшипник должен быть установлен выше на величину полуразности диаметров выточки и выступа.

Допуски на центровку в этом случае могут быть взяты такими же, как и для двухопорных роторов (см. разд. Б, п. 4). После регулировки осевых зазоров полумуфты соединяют полным числом временных болтов или шпилек и производят проверку биения свободно подвешенного конца ротора в соответствии с изложенным выше.

Если величина биения превосходит допустимые величины, то необходимо определить причину биения. Причинами биения конца вала могут быть неравномерная затяжка болтов, неправильная обработка торцов полумуфт (неперпендикулярность торцов осям вращения), наличие забоин на торцах полумуфт и, наконец, искривление валов. Причину, вызвавшую биение вала, определяют методом исключения. Прежде всего определяют плоскость биения и равномерность затяжки болтов. Знание плоскости биения дает возможность определить, какие болты необходимо подтянуть. При подтяжке болтов нужно диаметрально противоположные болты слегка ослабить, но не настолько, чтобы нарушить прочность соединения. Если подтяжкой болтов невозможно добиться требуемого снижения биения, то следует убедиться в отсутствии забоин или засорения торцов полумуфт. Если и эта причина исключается, то биение может быть следствием неперпендикулярности торцов полумуфт (биение торцов) осям вращения (рис. П13-14, *а*) или же искривления одного из валов (рис. П13-14, *б* и *в*).

Для исключения последней причины необходимо проверить биение каждого из валов. Для этого конец вала, противоположный муфте, снова устанавливают на вкладыш подшипника, болты муфты извлекают и заменяют их несколькими болтами меньшего диаметра; между торцами полумуфт оставляют зазор 1—2 мм. Благодаря такому соединению полумуфт обеспечивается некоторая свобода перемещения валов и биение этого вала не будет передаваться двухопорному валу.

Биение каждого из валов определяют индикатором, устанавливаемым на шейку или в шлифовальных местах вблизи шеек. Если биение каждого из валов находится в пределах допусков (см. приложение 12), то остается единственная причина биения свободно подвешенного конца вала ротора — биение торцов полумуфт. Устранение этого дефекта может быть произведено проточкой (при наличии соответствующих условий) или шабровкой торцов; установки прокладок между торцами полумуфт следует избегать.

Прицентровка по этому методу заканчивается проверкой биения конца одноопорного вала ротора при соединении полумуфт временными болтами или шпильками. Если биение не превышает допуска, то устанавливают и затягивают постоянные болты, после чего проверяют биение окончательно.

Рассмотренный метод центровки, при котором полумуфты соединяются, когда достигнута параллельность их торцов, соответствует равенству нулю изгибающего момента в плоскости соединения полумуфт. Такая центровка, однако, в некоторых

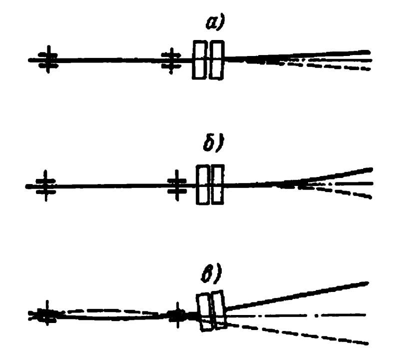


Рис. П13-14. Биение вала одноопорного ротора из-за биения торцов полумуфт (*а*), кривизны вала одноопорного ротора (*б*), кривизны вала двухопорного ротора (*в*)

случаях приводит к перегрузке одних подшипников за счет других.

Более равномерное распределение нагрузок достигается другим методом центровки, в результате которой перед соединением полумуфт имеется некоторое «раскрытие» их торцов внизу при одинаковых осевых зазорах в горизонтальной плоскости. Это раскрытие в крупных машинах часто значительно превосходит допуски на центровку и достигает долей миллиметра.

Рассмотрим влияние раскрытия полумуфт на распределение нагрузки на подшипники агрегата.

Двухопорный ротор *I* (рис. П13-15) без присоединенного к нему одноопорного ротора *II* имеет определенный прогиб вала; уровень, установленный на шейках вала у подшипников *1* и *2*, имеет определенные уклоны. Если к ротору *I* присоединить после прицентровки по первому методу ротор *II* при помощи жесткой муфты, то под влиянием веса ротора *II* упругая линия вала ротора *I* изменится, причем нагрузка на консольный конец вала

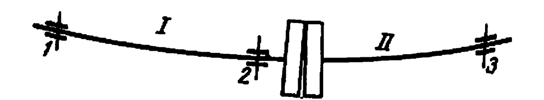


Рис. П13-15. Установка двухопорного и одноопорного роторов с раскрытием полумуфт внизу

подшипника *2*, а следовательно, и на подшипник *2* увеличится, а на подшипник *1* — уменьшится. Увеличение нагрузки на подшипник *2* будет более значительным, чем уменьшение нагрузки на подшипник *1*. Если же при центровке роторов сделать раскрытие внизу между торцами полумуфт, то при затяжке болтов полумуфт возникнет изгибающий момент в плоскости соединения. При этом раскрытие исчезнет, опорная реакция подшипника *2* уменьшится за счет подшипников *1* и *3*, т. е. распределение нагрузок на подшипники будет зависеть от величины раскрытия.

Таким образом, при определенной величине раскрытия можно получить более равномерное распределение нагрузки на все подшипники агрегата.

Если необходимое раскрытие полумуфт известно, то при центровке устанавливают одинаковые осевые зазоры по горизонтальному диаметру и соответствующие осевые зазоры по вертикальному диаметру. В остальном проверка и исправление центровки производятся в соответствии с изложенным выше.

Сравним нагрузки на подшипники двухмашинного агрегата после прицентровки вала одноопорного ротора рассмотренными методами на конкретном примере. Необходимые для определения нагрузок расстояния между осями подшипников и роторов, а также вес последних приведены на рис. П13-16.

Наиболее допустимые нагрузки (по заводским данным) на подшипники: *1* — 39 кН, *2* — 66 кН и *3* — 23,5 кН.

Так как при центровке по первому методу изгибающий момент в плоскости соединения полумуфт $M_{изг}=0$, то, заменяя статически не определимую систему вала трехопорного ротора двумя статически определимыми системами валов двухопорных роторов, определяем нагрузки на подшипники: *1* — 27,2 кН, *2* — 75,5 кН и *3* — 17,3 кН.

Как видим, средний подшипник перегружен, крайние — недогружены.

Принимая $M_{изг}=0$ в поперечной осевой плоскости подшипника *2*, определяем тем же способом нагрузки на подшипники от вала, сцентрованного по второму методу:

нагрузка на подшипник *1* от веса ротора P_1

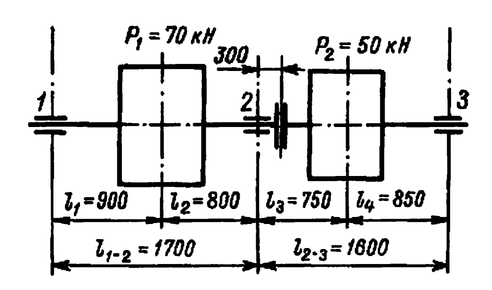


Рис. П13-16. К примеру нахождения нагрузок подшипников двухмашинного агрегата

$$Q_1 \approx P_1 \frac{l_2}{l_{1-2}} = 70 \frac{800}{1700} \approx 33 \text{ кН};$$

нагрузка на подшипник *2* от веса ротора P_1

$$Q_2' \approx P_1 \frac{l_1}{l_{1-2}} = 70 \frac{900}{1700} \approx 37 \text{ кН};$$

нагрузка на подшипник *2* от веса ротора P_2

$$Q_2'' \approx P_2 \frac{l_4}{l_{2-3}} = 50 \frac{850}{1600} \approx 27 \text{ кН};$$

нагрузка на подшипник *2* от веса обоих роторов

$$Q_2 \approx Q_2' + Q_2'' = 37 + 27 = 64 \text{ кН};$$

нагрузка на подшипник *3* от веса ротора P_2

$$Q_3 \approx P_2 \frac{l_3}{l_{2-3}} = 50 \frac{750}{1600} \approx 23 \text{ кН}.$$

В данном случае все подшипники нагружены в допустимых пределах. Здесь $M_{изг}$ в плоскости соединения полумуфт не равен нулю. Перед соединением полумуфт должно быть установлено определенное раскрытие их торцов, соответствующее полученному распределению нагрузок на подшипники.

При центровке с учетом веса роторов их устанавливают так же, как и в первом случае; при этом добиваются, чтобы между полумуфтами были одинаковые осевые зазоры по концам горизонтального диаметра в пределах допусков центровки двухопорных роторов. Затем соединяют полумуфты временными болтами или шпильками и подвешивают к крану конец одноопорного ротора вблизи его подшипника во всем так же, как и при первом

способе, за исключением того, что кроме винтовой стяжки к стропу прикрепляют динамометр (если пределы измерений динамометра слишком малы, то он может быть использован совместно с полиспастом). Затем на шейку вала устанавливают индикатор в вертикальной плоскости и при помощи винтовой стяжки приподнимают конец вала на 0,01—0,03 мм, контролируя эту величину по индикатору. Показания динамометра в этом случае соответствуют приблизительно опорной реакции подшипника.

Для получения рассчитанной нагрузки на подшипник одноопорного ротора конец его вала должен занимать такое положение по высоте, при котором динамометр покажет величину этой нагрузки. Поэтому, если показания динамометра оказались меньше расчетных, то приподнимают конец ротора настолько, чтобы показания динамометра равнялись расчетным. Для этого используют соответствующие подкладки под подшипниковый стояк, после чего снова проверяют нагрузку динамометром. Если же показания динамометра оказываются больше расчетной величины, то необходимо из-под подшипникового стояка вынуть часть прокладок или уменьшить их толщину. После окончания регулировки положения подшипника по высоте роторы раздвигают на 1—2 мм и измеряют осевые зазоры по вертикальному диаметру; разность величин этих зазоров и дает величину необходимого раскрытия полумуфт. Измеряют также уклоны шеек по уровню и все эти данные заносят в соответствующую техническую документацию. После этого снова соединяют полумуфты временными болтами и проверяют биение подвешенного к крану конца ротора так же, как и при первом методе проверки центровки. Затем полумуфты соединяют постоянными болтами и производят повторную проверку биения конца ротора, как указано выше.

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

УСТРАНЕНИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВИБРАЦИИ

А. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Механическими колебаниями или *вибрацией* называется чередование возрастания и убывания смещения точки механической системы, например машины или станка. Колебательными или вибрационными смещением, скоростью или ускорением вибрирующего тела называются мгновенные значения этих величин.

Вибрация вызывается *возмущающей силой*, которая возникает по различным причинам механического и электромагнитного характера (см. § 4-6).

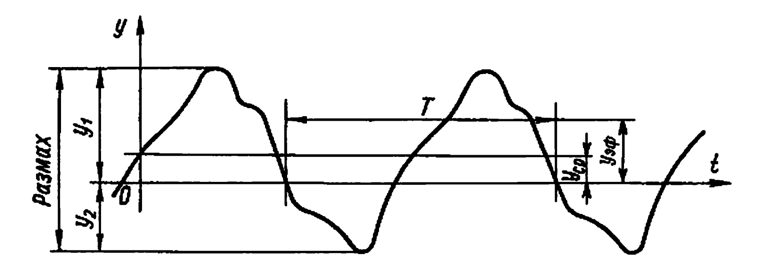


Рис. П14-1. Периодические колебания

При работе машины обычно имеет место периодическая вибрация, при которой определенные значения виброcмещения, виброскорости и виброускорения повторяются через одинаковые промежутки времени в одной и той же последовательности.

Частота f периодических колебаний (рис. П14-1), т. е. число повторяющихся циклов колебаний в секунду, измеряется в *герцах:*

$$f = 1/T, \qquad (П14\text{-}1)$$

где T — *период* колебаний, равный наименьшему промежутку времени, через который повторяется цикл колебаний.

Размах периодических колебаний — абсолютное значение отклонения колебательной величины от одного крайнего значения до другого. При различных знаках крайних значений колебательных величин размах равен сумме их абсолютных значений (рис. П14-1).

Периодические колебания любой формы характеризуются некоторыми средними значениями колебательных величин за период.

Средним значением называется среднее арифметическое всех мгновенных значений колебательной величины за период T (рис. П14-1).

Действующим или *эффективным* значением называется корень квадратный из среднего квадратического значения всех мгновенных значений колебательной величины за период T (рис. П14-1).

Эквивалентным значением называется эффективное значение колебательной величины, умноженное на $\sqrt{2}$.

Периодические колебания вибрационных величин (смещение, скорость, ускорение), изменяющиеся во времени по закону синуса (или косинуса), называются *гармоническими* (рис. П14-2):

$$y = A \sin(\omega t + \psi), \qquad (П14\text{-}2)$$

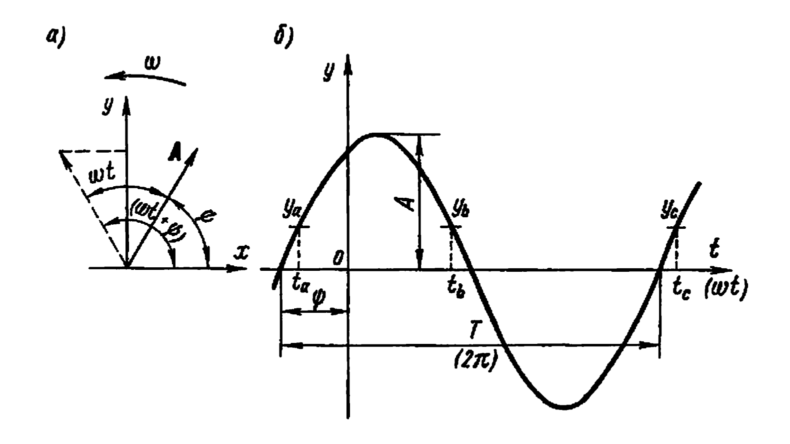


Рис. П14-2. Гармонические колебания

где A — *амплитуда*, равная наибольшему абсолютному значению величины y; t — время от начала отсчета; $(\omega t+\psi)$ — *фазовый угол*; ψ — начальный фазовый угол; ω — угловая частота.

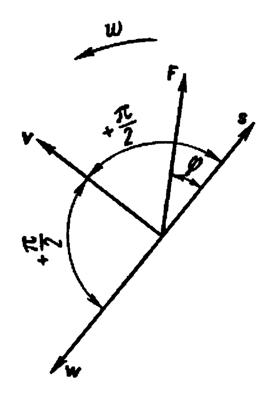
Наряду с графическим изображением в прямоугольных координатах (рис. П14-2, *б*) гармонические колебания изображаются также *условным вектором*, длина которого равна в определенном масштабе амплитуде колебаний; этот вектор вращается против часовой стрелки с угловой частотой ω. При этом подразумевается, что проекция вектора на ось Oy в любой момент времени равна по величине и направлению соответствующему мгновенному значению колебательной величины (рис. П14-2, *а*).

В дальнейшем для сокращения будем говорить «вектор смещения», «вектор ускорения» и т. п. При этом нужно помнить, что имеется в виду вектор *вращающийся*, проекция которого изображает мгновенное значение рассматриваемой колебательной величины.

Применение векторных диаграмм существенно упрощает расчеты при выполнении работ по балансировке.

Фазой называется характеристика гармонических колебаний в данный момент, которая определяется не только мгновенным значением колебательной величины, но и направлением изменения этого значения. Например, в моменты времени t_a, t_b и t_c (рис. П14-2, *б*) все мгновенные значения y_a, y_b и y_c равны по значению и знаку, но изменяются одинаково только значения в моменты времени t_a и t_c, отличающиеся друг от друга на полный период.

Рис. П14-3. Векторная диаграмма возмущающей силы **F**, вибрационного смещения **s**, скорости **v** и ускорения **w**



При совместном рассмотрении синхронных колебаний различных величин, т. е. гармонических колебаний одинаковой частоты, их изображают на одной векторной диаграмме.

Важной величиной, характеризующей соотношение различных синхронных колебаний, является сдвиг их одинаковых фаз во времени, который для сокращения называют просто *сдвигом фаз*.

Сдвиг фаз равен разности начальных фазовых углов и определяется на диаграмме углом между соответствующими векторами.

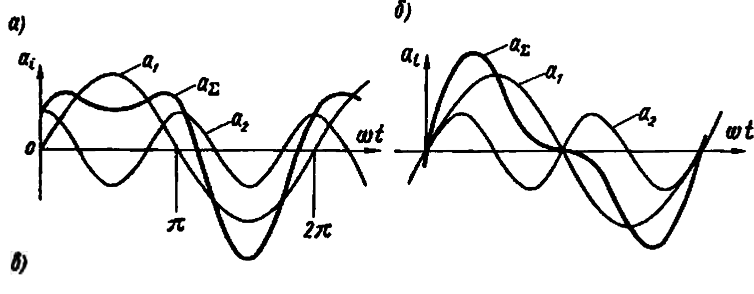
На диаграмме (рис. П14-3) в качестве примера изображены векторы гармонической возмущающей силы и вызываемых ею вибрационных величин — смещения **s**, скорости **v** и ускорения **w**, сдвиг фаз которых составляет $\pi/2$.

Б. ПРОСТЕЙШИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ НАД ГАРМОНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

В результате сложения (или вычитания) синхронных колебаний однородных величин, действующих по одной прямой, образуются гармонические колебания той же частоты. Результирующие колебания изображаются вектором, вращающимся с той же угловой частотой и равным геометрической сумме векторов, изображающих суммируемые колебания. Вращающийся вектор можно геометрически разложить на векторы, изображающие составляющие синхронные колебания.

При проведении работ по снижению вибрации важным является также определение соотношений между синхронными колебаниями, например между возмущающей силой и вызываемой ею вибрацией. Как было указано, вектор **A**, изображающий гармонические колебания, определяется амплитудой A и начальным фазовым углом ψ. Единый символ, обозначаемый A или $A\angle\psi$, охватывает амплитуду и угол и называется *комплексным числом* (комплексом), которое соответствует вектору **A**; A называется *модулем*, ψ — *аргументом* комплекса.

При делении вектора $\mathbf{A}_1$ на вектор $\mathbf{A}_2$ нужно модуль A_1 разделить на модуль A_2 и из аргумента ψ_1 вычесть ψ_2.



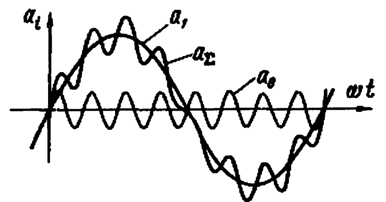


Рис. П14-4. Сложение гармонических колебаний различной частоты: *а, б, в* — соответственно $a_\Sigma = a_1 + a_2 = \sin \omega t + 0{,}5 \sin (2\omega t + 90°)$; $a_\Sigma = a_1 + a_2 = \sin \omega t + 0{,}5 \sin (2\omega t + 0)$; $a_\Sigma = a_1 + a_2 = \sin \omega t + 0{,}2 \sin (8\omega t + 0)$

В результате получим комплекс $\dot{\chi} = \frac{A_1}{A_2} \angle(\psi_1 - \psi_2)$, который показывает, что вектор $\mathbf{A}_1$ повернут относительно $\mathbf{A}_2$ на угол $(\psi_1 - \psi_2) = \varphi$. При умножении $\mathbf{A}_2$ на $\dot{\chi}$ (или $\chi \angle \varphi$) получим $\mathbf{A}_2 \chi = A_1 \angle (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_2) = A_1 \angle \varphi_1$.

При наложении гармонических колебаний различной частоты *нельзя* применять вращающиеся векторы. В этом случае результирующие колебания, называемые *полигармоническими*, определяются *алгебраическим сложением* мгновенных значений суммируемых колебаний.

Такое сложение удобно производить графически в прямоугольной системе координат. Частота и форма результирующих колебаний зависят от числа суммируемых гармонических колебаний (гармоник), а также от соотношения частот, амплитуд и начальных фазовых углов слагаемых.

Если частоты суммируемых гармоник кратны наименьшей частоте одной из них, то последняя называется *основной*. В этом случае частота результирующих полигармонических колебаний равна частоте основной гармоники.

На рис. П14-4 приведены в качестве примера графики сложения гармоник с частотами, основной и двойной, а также основной и восьмеричной.

Сложные периодические (негармонические) колебания можно разложить на гармоники, т. е. представить в виде суммы гармонических составляющих. Такое разложение производится с помощью приборов, называемых *анализаторами*.

В. ВИБРАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ

Причины повышенной вибрации электрических машин рассмотрены в § 4-6, нормы для оценки вибрации — в приложении 12, разд. Г.

До начала работ по снижению вибрации необходимо выявить вызывающие ее причины, что часто является нелегкой задачей и требует в ряде случаев подробного обследования не только данной, но и других машин агрегата. При этом нужно измерить вибрацию всех подшипников агрегата, а иногда и других узлов при различных режимах работы и при различных частотах вращения вала.

Очень часто для определения причин вибрации необходимо разложение измеренных колебаний на гармонические составляющие. При этом особенно важно выделение колебаний основной и двойной частоты.

Если в результате проведенного обследования получены данные, указывающие на возможные механические неисправности некоторых узлов или на дефекты электромагнитного характера, то прежде всего нужно произвести соответствующую проверку машины.

Повышенная вибрация, вызываемая неверным сопряжением валов, дефектами подшипников или вентиляторов, витковыми замыканиями в роторе, двойной жесткостью ротора, резонансами отдельных узлов и т. п., не может быть устранена балансировкой ротора. Только в тех случаях, когда обследованием установлена неуравновешенность ротора, можно принять решение о проведении его балансировки.

Г. НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЬ РОТОРА

Неуравновешенностью ротора, рассматриваемого как абсолютно твердое тело, называется несовпадение его главной, центральной, оси инерции с осью вращения. В зависимости от распределения масс ротора различают неуравновешенность трех видов (ГОСТ 19534—74).

1. Статическая неуравновешенность. Она имеет место, когда главная ось инерции проходит через центр масс c ротора, оставаясь параллельной оси вращения Ox (рис. П14-5, a).

В этом случае все неуравновешенные силы инерции, приведенные к центру масс вращающегося ротора, дают только главный вектор $\mathbf{R}_{ст}$, главный момент равен нулю. Такая неуравновешенность может быть выявлена без вращения ротора, например на параллелях. При вращении симметричного ротора в этом случае к подшипникам приложены две равные и одинаково направленные возмущающие силы.

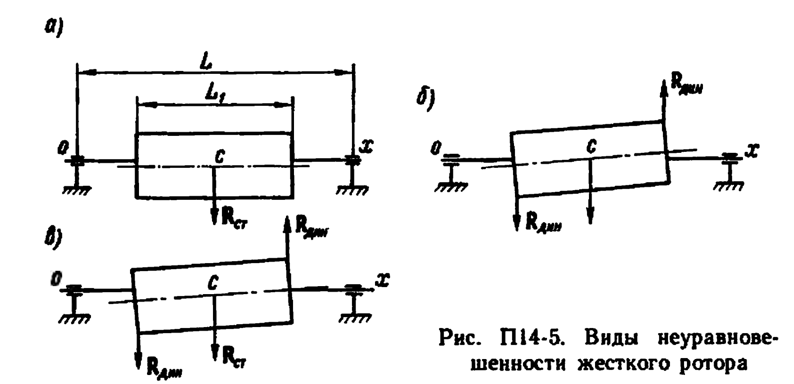


Рис. П14-5. Виды неуравновешенности жесткого ротора

2. Моментная неуравновешенность. Она возникает, когда главная ось инерции пересекает ось вращения в центре масс (рис. П14-5, *б*). В этом случае все неуравновешенные силы инерции, приведенные к центру масс вращающегося ротора, дают только главный момент $\mathbf{R}_{дин} \times L_1$, главный вектор равен нулю. Эта неуравновешенность выявляется только при вращении ротора, когда возникает возмущающий момент, вызывающий вращательные колебания ротора относительно поперечной оси, проходящей через центр масс.

3. Динамическая неуравновешенность. Этот вид неуравновешенности характеризуется наличием одновременно статической и моментной неуравновешенности ротора (рис. П14-5, *в*). В общем случае главный вектор и главный момент находятся в разных осевых плоскостях ротора, а вызываемые ими возмущающие силы, приложенные к подшипникам в любой осевой плоскости, сдвинуты по фазе. Ось ротора и его главная, центральная, ось инерции пересекаются не в центре масс или перекрещиваются.

Дисбалансом называется вектор, равный произведению неуравновешенной массы на радиус-вектор ее центра относительно оси ротора, называемый *эксцентриситетом центра массы.*

Направление дисбаланса совпадает с направлением эксцентриситета.

Главный вектор дисбалансов ротора $\mathbf{D}$ равен сумме всех векторов-дисбалансов ротора и вращается вместе с ротором.

Статическая неуравновешенность ротора полностью определяется главным вектором дисбалансов $\mathbf{D}_{ст}$, или эксцентриситетом центра массы ротора $e_{ст}$, или относительным смещением главной, центральной, оси инерции и оси ротора, равным значению эксцентриситета центра массы $e_{ст}$.

Значение $e_{ст}$, равное отношению модуля D главного вектора дисбалансов к массе ротора M, называется также *удельным*

дисбалансом, так как определяет дисбаланс, приходящийся на 1 кг массы ротора.

Д. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ РОТОРА

Рассмотрим колебания в горизонтальной осевой плоскости симметричного ротора на податливых опорах, например, явнополюсной синхронной машины.

Принимаем для упрощения следующие допущения:

а) ротор является *абсолютно твердым телом* (имеет массу M);

б) подшипники безмассовые и обладают одинаковыми *коэффициентами жесткости* $k_п$, т. е. силой, которую нужно приложить к подшипнику, чтобы сместить его на единицу длины; ротор сопряжен с подшипниками *шарнирно*;

в) сопротивление колебательному движению ротора сосредоточено в подшипниках, пропорционально скорости этого движения; оно определяется *коэффициентом демпфирования* c.

Если обмотка одного из полюсов закорочена, то при наличии тока в роторе результирующая сила магнитного притяжения между ротором и статором будет направлена в сторону, противоположную дефектному полюсу. При этом статическое смещение оси ротора (и подшипников) составляет

$$X_{ст}=\frac{F}{2k_п}. \qquad (П14\text{-}3)$$

Если в рассмотренном статическом состоянии системы будет выключен ток возбуждения, то под влиянием сил упругости подшипников ротор с подшипниками начнет двигаться к положению равновесия, пройдет его и будет совершать быстро затухающие свободные (собственные) колебания относительно этого положения до израсходования запаса энергии, полученного системой «ротор — опоры» при статическом прогибе.

Частота собственных колебаний в этом случае может быть определена формулой [11]

$$f_c=\frac{n_c}{60}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_п}{M_п}} \text{ и } n_c\approx 9{,}55\sqrt{\frac{k_п}{M_п}}, \qquad (П14\text{-}4)$$

где f_c — частота собственных колебаний, Гц; n_c — частота собственных колебаний в минуту; $k_п$ — коэффициент жесткости подшипника; $M_п$ — масса ротора, отнесенная к одному подшипнику, кг.

При равномерном вращении ротора с током в обмотке полюсов сила F вызывает в любой осевой плоскости поперечные

вынужденные колебания ротора (и подшипников), определяемые формулой:

$$x = X_a \sin(\omega t - \varphi), \qquad (П14\text{-}5)$$

где X_a — амплитуда колебания — наибольший динамический прогиб в процессе колебаний; ω — угловая частота вращения ротора, рад/с, равная $n/9{,}55$, где n — частота вращения ротора, об/мин.

Отношение $X_a/X_{ст}$, называемое *коэффициентом динамичности* β, и угол φ (сдвиг фаз возмущающей силы и колебаний смещения) зависят от параметров системы и от частоты вращения ротора [11].

Не останавливаясь более подробно на этом виде вынужденных колебаний, вызываемых *силовым возмущением*, рассмотрим вынужденные колебания вращающегося ротора, вызываемые установленными на нем грузами.

Пусть на тот же полностью сбалансированный *ротор* установлен в поперечной плоскости симметрии груз с массой m на расстоянии r от оси вращения, например распорка между полюсами. Если ротор вращается с частотой n, то в любой осевой плоскости к каждому из подшипников приложена половина неуравновешенной возмущающей силы инерции, амплитуда которой равна

$$F_a = mr\omega^2 \approx 0{,}011 mrn^2, \qquad (П14\text{-}6)$$

где F_a — в ньютонах, m — в килограммах, r — в метрах.

При изменении частоты вращения амплитуда силы здесь не остается постоянной, как в предыдущем случае, а изменяется пропорционально квадрату частоты вращения. Такая сила называется *инерционной*.

Решение соответствующего уравнения движения [11] приводит к следующим выражениям соответственно для мгновенного значения и амплитуды колебательного смещения:

$$x = X_a \sin(\omega t - \varphi) \text{ и } X_a = \beta_{ин} e,$$

или размах

$$A = 2X_a = 2\beta_{ин} e, \qquad (П14\text{-}7)$$

где

$$\beta_{ин} = \frac{\varepsilon^2}{\sqrt{(1-\varepsilon^2)^2 + (2D\varepsilon)^2}}; \quad \varepsilon = \frac{n}{n_c}, \quad e = \frac{mr}{M} \qquad (П14\text{-}8)$$

и D — безразмерный коэффициент, зависящий от параметров системы «ротор — опоры».

Так как параметр e является радиусом неуравновешенной массы m, приведенным к общей массе ротора M, т. е. *эксцентриситетом ротора*, то физический смысл коэффициента $\beta_{ин}$ заключается в том, что он показывает, во сколько раз при инерционном возмущении реальной системы амплитуда колебаний подшипника превышает его амплитуду колебаний при отсутствии в подшипнике сил упругости и трения.

На рис. П14-6 приведены диаграммы зависимости коэффициента $\beta_{ин}$ и угла φ от n/n_c.

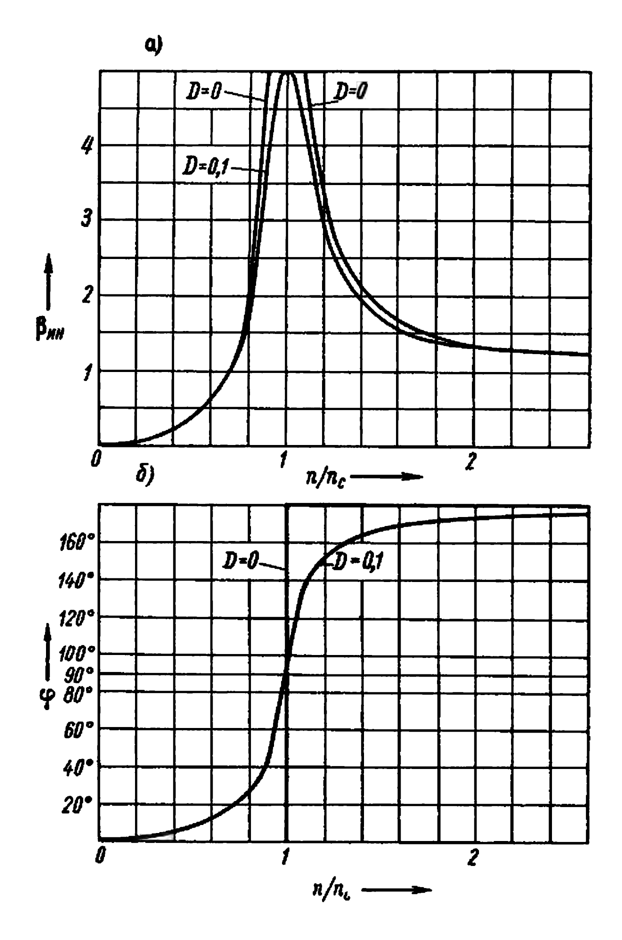


Рис. П14-6. Инерционное возмущение колебаний подшипника в зависимости от n/n_c: *а* — коэффициент $\beta_{ин}=x_a'/e$; *б* — сдвиг фаз φ возмущающей силы и вибрационного смещения

Из выражений (П14-8) и диаграммы видно, что при $n/n_c \ll \ll 1$ коэффициент $\beta_{нн} \approx 0$, при $n/n_c \gg 1$ коэффициент $\beta_{нн} \approx 1$, а при $n/n_c \approx 1$ коэффициент $\beta_{нн}$ достигает наибольшего значения.

Если на роторе будут установлены два симметричных груза, каждый из которых имеет массу m, то

$$e_{сим} = \frac{2mr}{M} \text{ и } A_{сим} = 2\beta_{нн} e_{сим} = \frac{4mr}{M} \beta_{нн}. \qquad (П14\text{-}9)$$

Установим на уравновешенный ротор два кососимметричных груза, каждый из которых расположен на расстоянии r от оси и имеет массу m. При вращении ротора в любой его осевой плоскости на подшипники действует возмущающий момент, имеющий частоту вращения; он вызывает в рассматриваемой плоскости вращательные колебания ротора и подшипников относительно поперечной оси симметрии, перпендикулярной плоскости колебаний и проходящей через центр масс ротора.

При этих колебаниях роль массы играет момент инерции ротора относительно поперечной оси симметрии; моменты сопротивления движению создаются силами упругости и трения в подшипниках.

Частота свободных вращательных колебаний симметричного жесткого ротора на податливых опорах определяется формулой

$$n_{с.\,вращ} = n_c \frac{L}{2\rho}, \qquad (П14\text{-}10)$$

где n_c — частота свободных поступательных колебаний того же ротора в минуту; L — расстояние между поперечными осями опор (см. рис. П14-5); ρ — радиус инерции ротора относительно поперечной оси, проходящей через центр масс ротора.

Размах вращательных колебаний подшипников, вызываемых кососимметричными грузами, установленными на роторе,

$$A_{вр} = A_{сим}\theta, \qquad (П14\text{-}11)$$

где $A_{сим}$ — размах поперечных колебаний подшипников при таких же симметричных грузах; θ — безразмерный коэффициент, зависящий от параметров, входящих в выражение (П14-8) для $\beta_{нн}$, L_1/L и $2\rho/L$ (см. рис. П14-5).

Установка на ротор одностороннего груза массой m равносильна установке в той же осевой плоскости симметричной и кососимметричной пар грузов массами $m/2$.

В случае когда колебания, вызываемые этими парами грузов (т. е. односторонним грузом), складываются алгебраически, размах колебаний одного из подшипников достигает наибольшей величины и составляет

$$A_{одност}=A_{сим}+A_{вр}=\frac{2mr}{M}\beta_{ин}(1+\theta). \qquad (П14\text{-}12)$$

Е. КРИТИЧЕСКИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА СИСТЕМЫ «РОТОР — ОПОРЫ»

Из выражений (П14-7) и (П14-8) и рис. П14-6 видно, что когда частота возмущающей силы совпадает с частотой свободных незатухающих колебаний системы «ротор — опоры», сильно увеличиваются колебания подшипников. Такое явление называется *резонансом*. Частота возмущающей силы в системе «ротор — опоры» зависит от частоты вращения ротора. Поэтому резонанс в этой системе наступает при совпадении частоты вращения ротора n (в оборотах в минуту) с частотой свободных поступательных $n_{с.сим}$ или вращательных $n_{с.вращ}$ колебаний (в колебаниях в минуту) ротора в рассматриваемой осевой плоскости.

Таким образом, ротор на податливых опорах имеет две критические частоты вращения и две формы свободных колебаний (рис. П14-7), которые для сокращения назовем жесткими.

Первая жесткая критическая частота вращения в оборотах в минуту [см. выражение (П14-4)]

$$n_I=9{,}55\sqrt{k_п/M_п}. \qquad (П14\text{-}13)$$

Вторая жесткая критическая частота вращения в оборотах в минуту [см. выражение (П14-10)]

$$n_{II}=n_I\frac{L}{2\rho}. \qquad (П14\text{-}14)$$

Для обычных машин $L/(2\rho)\approx 1{,}8 \dots 2{,}8$.

Абсолютно жестких роторов не существует. Кроме того, у реальных роторов масса и жесткость распределены вдоль всей линии вала. В связи с этим система «ротор — опоры» имеет не две, а ряд критических частот вращения, соответствующих частотам свободных изгибных колебаний ротора.

Для вала постоянного сечения, вращающегося в абсолютно жестких опорах, значения этих частот вращения определяются по формуле

$$n_к=9{,}55\left(\frac{k\pi}{l}\right)^2\sqrt{\frac{EJ}{\mu}}, \qquad (П14\text{-}15)$$

где EJ — жесткость вала на изгиб; μ — масса вала на единицу длины; $k=1, 2, 3, \dots$

Критические частоты вращения такого вала находятся в соотношении

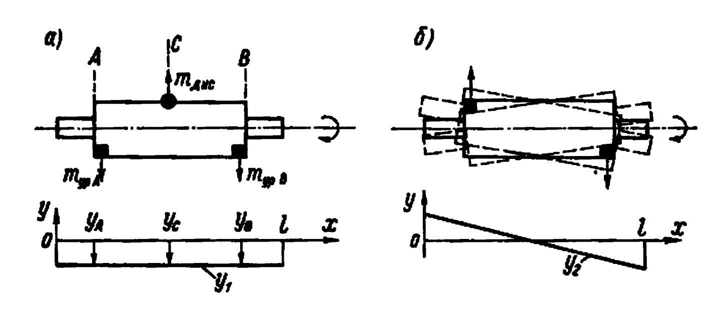


Рис. П14-7. Первая (*а*) и вторая (*б*) формы собственных колебаний жесткого ротора на податливых опорах

$$n_1 : n_2 : n_3 : \ldots = 1 : 2^2 : 3^2 : \ldots \qquad (П14\text{-}16)$$

Каждой критической частоте вращения соответствует своя форма прогиба, которая является плоской синусоидой $y_к = \sin k \frac{\pi}{l} x$. Число полуволн этой синусоиды по длине вала равно порядковому номеру критической частоты вращения.

У реальных роторов жесткости и массы распределены вдоль оси неравномерно, а опоры не бывают абсолютно жесткими, поэтому формы прогиба реальных роторов отличаются от синусоид. На рис. П14-8 показаны три первые формы прогиба (y_1, y_2, y_3) для ротора турбогенератора ТВВ-165-2 в условиях его установки на электростанции. Там же приведены и значения критических частот вращения n_1, n_2, n_3. Соотношения (П14-16) в этом случае уже не выполняются.

В зависимости от соотношения рабочей и критических частот вращения роторы электрических машин разделяются на жесткие и гибкие. Четкой границы между ними нет, однако условно ее принимают следующим образом: если $n_{раб} < 0{,}7 n_1$, **ротор относят к классу жестких, в противном случае — к классу гибких роторов.**

При частотах вращения вала, которые значительно ниже его изгибных критических частот вращения, т. е. когда ротор можно считать жестким, упругий прогиб вала пренебрежимо мал по сравнению с упругим прогибом опор. В этом случае колебания ротора происходят таким образом, что при наличии одного статического дисбаланса ось ротора колеблется в пространстве, оставаясь параллельной самой себе, а при наличии динамического дисбаланса ось ротора совершает вращательные колебания вокруг центра тяжести (см. рис. П14-7).

При частотах вращения вала, близких к критическим, т. е. когда ротор считается гибким, прогибы вала становятся

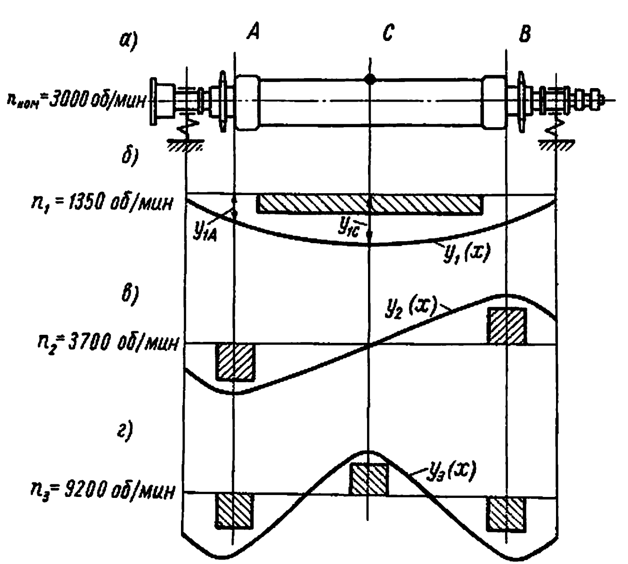


Рис. П14-8. Три первые формы прогиба свободных изгибных колебаний ротора турбогенератора ТВВ-165-2 на податливых опорах

соизмеримыми с величинами вибраций опор и даже существенно бо́льшими их.

Упругая линия вала при наличии нескольких видов дисбаланса представляет собой пространственную кривую, форма которой изменяется при изменении частоты вращения.

Ж. ЗАДАЧА БАЛАНСИРОВКИ

При вращении неуравновешенного вала возникающие центробежные силы оказывают переменные давления на опоры. Поскольку жесткость опор у реальных машин не бывает бесконечной, эти давления вызывают их вибрации.

Задача балансировки ротора состоит в том, чтобы достичь такого распределения корректирующих масс на роторе, при котором вибрации опор не будут превышать допускаемых норм во всем диапазоне частот вращения ротора (от нуля до рабочей частоты вращения).

При установившихся колебаниях вращающегося ротора в его осевой плоскости справедливо уравнение работ

$$\sum my = R_{\text{I}} y_{\text{I}} + R_{\text{II}} y_{\text{II}}, \qquad (\text{П14-17})$$

где $\sum my$ — сумма работ, совершаемых всеми неуравновешенными и корректирующими массами ротора и *рассматриваемых как*

векторы, имеющие направление вызываемых ими центробежных сил; $y_{\rm I}$ и $y_{\rm II}$ — прогибы опор; $R_{\rm I}$ и $R_{\rm II}$ — их реакции.

Реакции опор вращающегося вала будут отсутствовать ($R_{\rm I}=R_{\rm II}=0$), т. е. вал будет сбалансирован, если работа, которую совершают неуравновешенные и корректирующие массы на прогибах в плоскостях своего размещения, равна нулю:

$$\sum my=0. \qquad (\text{П14-18})$$

В этом состоит условие сбалансированности вала. Для жестких роторов сбалансированность, достигнутая при одной частоте вращения, сохраняется и для других частот вращения, так как соотношения между прогибами ротора в различных плоскостях, а следовательно, и равенство (П14-18) остаются справедливыми.

Иначе ведет себя гибкий ротор. Пусть, например, в его середине находится дисбаланс $m_{\text{дис}}$. Сбалансируем этот ротор при низкой частоте вращения, когда он ведет себя как жесткий (например, на балансировочном станке). Корректирующие массы в торцевых плоскостях A и B (см. рис. П14-7, *а*) должны удовлетворять равенству (П14-18):

$$m_{\text{дис}}y_C+m_{\text{ур}\,A}y_A+m_{\text{ур}\,B}y_B=0.$$

Поскольку $y_A=y_B=y_C$, $m_{\text{ур}\,A,B}=-m_{\text{дис}}/2$.

Если теперь повысить частоту вращения ротора до первой критической (уже не на станке, а в своих подшипниках), то упругая линия вала будет иметь форму, подобную показанной на рис. П14-8, *б*; поскольку при этом $y_{1C}\neq y_{1A}=y_{1B}$, корректирующие массы оказываются равными $m_{\text{ур}}=-\frac{m_{\text{дис}}}{2}\frac{y_{1C}}{y_{1A,1B}}$, т. е. бо́льшими, чем прежде ($y_{1C}>y_{1A}$). С корректирующими массами, установленными при низкой частоте вращения, ротор опять оказывается несбалансированным.

При второй критической частоте вращения $y_{2C}=0$ равенство (П14-18) удовлетворяется и без корректирующих масс.

Если частоту вращения повысить до третьей критической (рис. П14-8, *г*), то для балансировки ротора в торцевых плоскостях потребуются корректирующие массы, меньшие дисбаланса $m_{\text{дис}}$ и расположенные с ним по одну сторону от оси вращения. В этом можно убедиться на основании выражения (П14-18) и рис. П14-8, *г*.

Из рассмотренного примера видно, что, размещая корректирующие массы в двух плоскостях, гибкий ротор можно сбалансировать только для *одной частоты вращения*. При иных частотах

вращения он опять может оказаться неуравновешенным. В этом состоит основная трудность балансировки гибких роторов.

3. ВИДЫ БАЛАНСИРОВКИ. СТАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА

Балансировку разделяют на статическую, моментную и динамическую. Статическая балансировка производится без вращения ротора; с ее помощью уменьшается только статическая составляющая неуравновешенности.

При наличии в роторе неуравновешенности двух видов статическая балансировка лишь облегчает последующую динамическую балансировку, которая является обязательной операцией. Динамическая балансировка производится при вращении ротора и позволяет уменьшить неуравновешенность всех видов.

Статическая балансировка осуществляется на параллельных стальных призмах *(параллелях)*, закаленные поверхности которых должны быть тщательно отшлифованы (не ниже $\overset{3,2}{\surd}$). Установка на специальных подставках должна практически исключать прогиб нагруженных параллелей; отклонение рабочих плоскостей последних от горизонтальной плоскости не должно превышать 0,1 мм на 1 м.

Ширина параллели b определяется неравенством

$$b \geqslant M/d, \qquad (\text{П14-19})$$

где M — масса ротора, приходящаяся на одну параллель, кг; d — диаметр шейки ротора, мм.

Ротор, установленный шейками на параллели, выводится из равновесия и предоставляется самому себе (рис. П14-9). После нескольких колебаний он устанавливается *«легким местом»* вверху, которое отмечается (точка a) на вертикали, проходящей через ось ротора.

После этого подбирается такая корректирующая масса, установка которой в «легком месте» приводит к безразличному состоянию ротора в любом положении на параллелях. Эту операцию для ускорения полезно проводить с применением простого

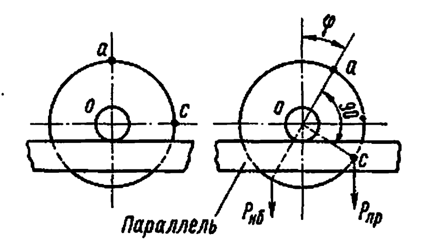


Рис. П14-9. Статическая балансировка

$P_{нб}$ — сила веса неуравновешенной массы; $P_{пр}$ — сила веса пробной корректирующей массы

расчета. Для этого на роторе отмечают (рис. П14-9) два положения: а) точку a после самоустановки ротора без груза; б) угол φ после самоустановки ротора с пробным грузом, прикрепленным в точке C под углом 90° к радиусу Oa. Так как $m_{дис}=m_{ур}$, то корректирующая масса, которая должна быть установлена в точке a («легкое место»), определяется формулой

$$m_{ур}=m_{пр}/\text{tg}\ \varphi, \qquad (П14\text{-}20)$$

где $m_{ур}$ — требуемая корректирующая масса, кг; $m_{пр}$ — пробная корректирующая масса, кг.

При хорошем состоянии рабочих поверхностей и аккуратной установке параллелей статической балансировкой можно довести удельную остаточную неуравновешенность (остаточный эксцентриситет) до 5—10 мкм [см. выражения (П14-8)].

И. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ВИБРОПРИБОРАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКЕ

Для проведения динамической балансировки необходнмо располагать аппаратурой, позволяющей объективно оценнвать вибрацню подшипников.

Как было показано, величина вибрации — это вектор, поэтому нзмерения одной только величины этого вектора недостаточно для того, чтобы можно было судить об изменениях вибрации в процессе балансировки. Все методы балансировки предполагают использование аппаратуры, которая может измерять внбрацию как вектор, т. е. как амплитуду, так и фазу вибраций. Под фазой подразумевается сдвиг фаз измеряемой вибрации н опорного процесса, протекающего синхронно с вращением балансируемого ротора.

Среди такой аппаратуры наиболее широкое распространение получили электронные приборы с сейсмическими вибродатчиками и фазометрами, действующими на принципе стробоскопического эффекта. На рис. П14-10 приведена структурная схема такого прибора в процессе измерения вибраций.

Корпус вибродатчика *ВД* прижнмается к подшипнику либо вручную через штырь, либо путем закрепления и колеблется вместе с подшипником.

Подвижная система датчика, подвешенная внутри корпуса на пружинах, сконструирована так, что в диапазоне частот измеряемых колебаний она остается практически неподвижной (сейсмический подвес).

Взаимное перемещение корпуса и сейсмической массы датчика преобразуется в электрический сигнал, подаваемый на вход уснлителя *У*. После усиления сигнал выпрямляется детекто-

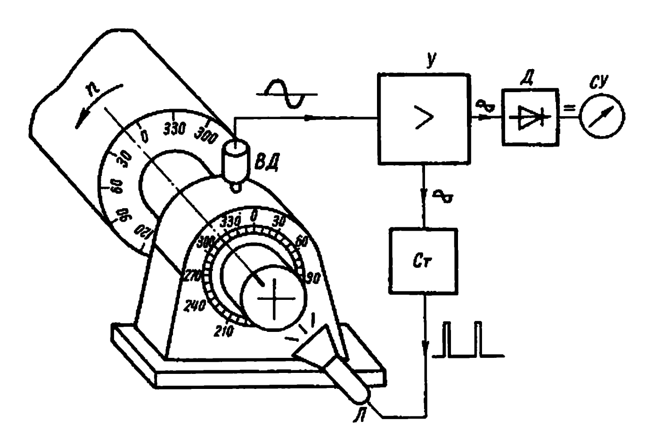


Рис. П14-10. Структурная схема балансировочного прибора в процессе измерения вибрации

ром *Д* и поступает на стрелочный указатель *СУ*, указывающий размах вибраций.

Параллельно из усилителя подается сигнал на блок стробоскопа *Ст*, где он преобразуется в импульсное напряжение, управляющее вспышкой безынерционной лампы *Л*. Если на торце балансируемого ротора нанесена отметка, то при стробоскопическом освещении она кажется неподвижной. Ее угловое положение определяется фазой напряжения вибродатчика или, что то же самое, фазой измеряемой вибрации.

Если вблизи торца ротора расположить неподвижную круговую шкалу, то угол, указываемый отметкой, можно считать начальным фазовым углом измеряемой вибрации. При изменении фазы вибраций отметка сдвигается относительно прежнего положения на угол, соответствующий сдвигу фазы вибрации.

Более сложные приборы, помимо указанных элементов, оснащаются фильтрами для частотного анализа кривой вибрации, частотомерами или тахометрами для контроля частоты вращения и другими устройствами, которые позволяют получать важную дополнительную информацию при сложных балансировках и вибрационных исследованиях. Однако наличие прибора, имеющего лишь измеритель размаха вибрации и фазометр, является необходимым и достаточным условием для возможности уравновешивания роторов обширного класса машин.

К. МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Для проведения динамической балансировки ротора в своих подшипниках необходимо располагать не только аппаратурой, но и определенной методикой.

Нельзя начинать балансировку машины, не имея заранее четкого представления о последовательности предстоящих операций или рассчитывая на то, что место установки нужной корректирующей массы удастся «нащупать» с помощью обхода.

В настоящее время существует несколько различных методов балансировки, в которых вектор требуемой корректирующей массы находится расчетным путем на основании приращений вибраций от установки на ротор пробных корректирующих масс. Каждый из этих методов позволяет достигнуть требуемой сбалансированности ротора машины, однако между ними имеются существенные различия как в последовательности операций процесса балансировки, так и в объеме необходимых расчетов.

Применяемые методы динамической балансировки основаны на предположении, что при неизменной частоте вращения ротора размахи основной гармонической составляющей вибрации подшипников на каждом шаге балансировки, т. е. от одного пуска к последующему, пропорциональны вызывающим их возмущающим силам и что сдвиг фаз возмущающей силы и вибрации при этом не изменяется.

Электрические машины в большинстве случаев имеют симметричное исполнение, и для них наиболее эффективной оказывается методика раздельного снижения статической и моментной составляющих динамической неуравновешенности ротора. Эта методика является частным случаем уравновешивания ротора гибких валов по формам свободных колебаний [31]. Обладая большой наглядностью и простотой расчетных операций, она позволяет в то же время производить балансировку ротора за малое число пусков.

До начала балансировки нужно выполнить следующие операции подготовки: произвести разметку плоскостей коррекции в направлении вращения с интервалами не более 30°; нулевые отметки с обеих сторон должны находиться в одной радиальной плоскости. На удобном для наблюдения торце ротора в той же плоскости краской наносится отметка — начальный радиус. Рядом располагается лимб для отсчета фазы по стробоскопу (рис. П14-10); угловая разметка лимба производится против вращения с интервалом не более 10°. Нулевая отметка лимба располагается вертикально.

Подготовка приборов производится в соответствии с прилагаемыми к ним инструкциями.

1. Балансировка в одной плоскости коррекции. Ознакомление с методом уравновешивания роторов в своих подшипниках начнем с рассмотрения балансировки маховика на жестком валу (рис. П14-11, *а*), у которого имеется лишь статическая неуравновешенность и только одна плоскость коррекции. При симметричном расположении опор неуравновешенная масса $\mathbf{m}_{дис}$ вызовет на опорах при исходном пуске равные и одинаково направленные (синфазные) вибрации $\mathbf{A}_1$, которые связаны с $\mathbf{m}_{дис}$ соотношением

$$\mathbf{A}_1 = \dot{k}\mathbf{m}_{дис}, \qquad (П14\text{-}21)$$

где $\dot{k} = k \angle \alpha$ — комплекс, называемый *балансировочной чувствительностью* (см. п. Б настоящего приложения).

Произведем второй пуск ротора, установив на него пробную корректирующую массу $\mathbf{m}_{пр}$; полученная вибрация

$$\mathbf{A}_2 = \dot{k}(\mathbf{m}_{дис} + \mathbf{m}_{пр}).$$

Из этих уравнений находим

$$\mathbf{m}_{дис} = \mathbf{m}_{пр}\frac{\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}. \qquad (П14\text{-}22)$$

Требуемая корректирующая масса $\mathbf{m}_{ур} = -\mathbf{m}_{дис}$,

$$\mathbf{m}_{ур} = \mathbf{m}_{пр}\frac{-\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}. \qquad (П14\text{-}22а)$$

Расчет $\mathbf{m}_{ур}$ по формуле (П14-22) удобно производить графоаналитически. На векторной диаграмме (рис. П14-11, *б*)

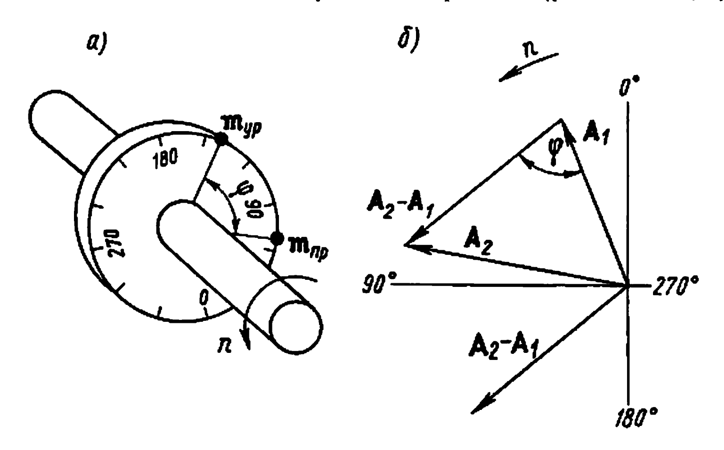


Рис. П14-11. Векторная диаграмма при балансировке в одной плоскости коррекции

строим в одинаковом масштабе векторы $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$; вектор, проведенный из конца вектора $\mathbf{A}_1$ к $\mathbf{A}_2$, равен их разности $\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1$; из диаграммы определяется его величина и направление, после чего дальнейший расчет производится аналитически.

Из диаграммы на рис. П14-11, *б* видно, что если вектор приращения вибрации от пробной корректирующей массы $\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1$ окажется равным и противоположно направленным вектору исходной вибрации $\mathbf{A}_1$, то ротор будет уравновешен, поскольку вибрация $\mathbf{A}_2$ окажется равной нулю. Для этого необходимо изменить вектор пробной корректирующей массы в отношении модулей векторов $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1$ и повернуть его на угол φ между векторами $-\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1$. Эта операция и производится при расчете умножением вектора $\mathbf{m}_{пр}$ на комплекс $\frac{-\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1}$.

Если уравнения (П14-21) и (П14-22а) решить относительно $\dot{k}$, то получим

$$\dot{k}=\frac{\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1}{\mathbf{m}_{пр}}, \qquad (П14\text{-}23)$$

т. е. *балансировочная чувствительность равна отношению векторов приращения вибрации и вызвавшей это приращение корректирующей массы и измеряется в* $\frac{мкм}{кг}\underline{|\ldots^\circ}$.

Балансировочную чувствительность для ротора данного типа и применяемой аппаратуры определяют по результатам балансировки, после чего уравновешивание однотипного ротора можно проводить с использованием известной величины $\dot{k}$.

Представим формулу (П14-22а) в несколько ином виде:

$$\mathbf{m}_{ур}=\frac{-\mathbf{A}_1}{\frac{\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1}{\mathbf{m}_{пр}}}=\frac{-\mathbf{A}_1}{\dot{k}}. \qquad (П14\text{-}24)$$

Формулой (П14-24) удобно пользоваться для расчета требуемой корректирующей массы, когда известна балансировочная чувствительность, например при повторной балансировке той же или однотипной машины.

Пример. При исходном пуске вибрация каждой из опор равна $\mathbf{A}_1=60\underline{|20}$. При пуске с пробной корректирующей массой $\mathbf{m}_{пр}=1{,}2\underline{|70}$ вибрации опор оказались равными $\mathbf{A}_2=75\underline{|80}$.

Строим на диаграмме (рис. П14-11, *б*) векторы $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$ и находим $(\mathbf{A}_2-\mathbf{A}_1)=69\underline{|130}$.

Требуемая корректирующая масса

$$m_{ур}=m_{пр}\frac{-A_1}{A_2-A_1}=1{,}2\underline{|70}\;\frac{-60\underline{|20+180}}{69\underline{|130}}=$$

$$=1{,}2\underline{|70}\cdot 0{,}87\underline{|70}=1{,}04\underline{|140}.$$

Требуемая корректирующая масса меньше пробной, так как приращение вибрации ΔA_1 больше исходной вибрации A_1; кроме того, вектор $m_{ур}$ оказывается повернутым относительно вектора $m_{пр}$ на угол $\varphi=+70°$ (т. е. по направлению вращения ротора). Угол φ соответствует такому повороту вектора ΔA_1, при котором последний оказывается направленным встречно с A_1 (рис. П14-11).

Определим балансировочную чувствительность:

$$\dot{k}=\frac{A_2-A_1}{m_{пр}}=\frac{69\underline{|130}}{1{,}2\underline{|70}}=57\underline{|60}.$$

2. Балансировка симметричного жесткого ротора в двух плоскостях коррекции. При балансировке симметричного двухопорного ротора по методу раздельного снижения составляющих неуравновешенности в расчетах используются не измеренные вибрации опор, а их составляющие, вызываемые статической и моментной неуравновешенностями. Нетрудно показать [11], что эти составляющие равны соответственно векторной полусумме и полуразности вибраций опор:

$$A'=\frac{A_{I}+A_{II}}{2};\quad A''=\frac{A_{I}-A_{II}}{2},\qquad (П14\text{-}25)$$

где A_I и A_{II} — векторы вибраций опор I и II; A' — составляющая вибраций опоры, вызываемая статической неуравновешенностью (симметричная составляющая); A'' — составляющая вибраций опоры, вызываемая моментной неуравновешенностью (кососимметричная составляющая).

Необходимость представления вибраций опор через симметричные и кососимметричные составляющие объясняется тем, что у симметричных роторов эти составляющие обладают важным свойством *взаимонезависимости:* при изменении статической составляющей дисбаланса изменяется только симметричная составляющая вибрации A', а кососимметричная A'' остается неизменной и наоборот.

На этом свойстве взаимонезависимости и основан метод раздельной балансировки:

1. Вибрации опор разлагают на симметричную и кососимметричную составляющие.

2. Статическая и моментная составляющие неуравновешенности балансируются раздельно: первая — по симметричным составляющим, вторая — по кососимметричным составляющим вибраций опор.

Расчет корректирующих масс производится по тем же формулам (П14-22а) и (П14-24), но в них нужно подставлять вместо вибраций опор соответствующие составляющие этих вибраций:

а) при снижении статической составляющей неуравновешенности: $\mathbf{m}_{пр}$ — вектор пробной корректирующей массы, входящей в статическую систему;

$$\mathbf{A}_1=\frac{\mathbf{A}_{1I}+\mathbf{A}_{1II}}{2};\quad \mathbf{A}_2=\frac{\mathbf{A}_{2I}+\mathbf{A}_{2II}}{2};$$

$\dot{k}'$ — балансировочную чувствительность к статической составляющей неуравновешенности (чувствительность к статике);

б) при балансировке моментной составляющей неуравновешенности: $\mathbf{m}_{пр}$ — вектор пробной корректирующей массы, входящей в моментную систему;

$$\mathbf{A}_1=\frac{\mathbf{A}_{1I}-\mathbf{A}_{1II}}{2};\quad \mathbf{A}_2=\frac{\mathbf{A}_{2I}-\mathbf{A}_{2II}}{2};$$

$\mathbf{A}_{1I}$ — вектор вибрации опоры со стороны I при первом пуске; $\mathbf{A}_{1II}$ — то же со стороны II; $\mathbf{A}_{2I}$ — вектор вибрации опоры со стороны I при втором пуске с пробной массой; $\mathbf{A}_{2II}$ — то же со стороны II; $\dot{k}''$ — балансировочную чувствительность к моментной составляющей неуравновешенности (чувствительность к паре).

При установке пробных и требуемых систем корректирующих масс необходимо учитывать, что входящие в систему массы должны быть строго одинаковы, а углы установки их должны совпадать или отличаться на 180°. В противном случае балансировка по одной из составляющих будет нарушать состояние другой.

Если в плоскостях коррекции устанавливаются на различных диаметрах массы, входящие в систему, то они должны быть обратно пропорциональны этим диаметрам.

Для расчетов по формулам (П14-22а) и (П14-24) можно использовать как вертикальные, так и горизонтальные вибрации; лучше брать те, которые больше.

Пример. Произведем динамическую балансировку синхронной машины (мощность $P=800$ кВт, $n=1500$ об/мин).

При исходном пуске (№ 1) машины все вибрации опор оказались повышенными (табл. П14-1), однако горизонтальные

Таблица П14-1

№ пуска	Вибрация, мкм|...°						Вектор корректирующей массы, кг|...°	
	Опоры I			Опоры II				
	В	Г	А	В	Г	А	в плоскости I	в плоскости II
1	72|80	100|350	80|80	70|120	120|50	75|110	—	—
2	52|130	36|50	55|120	100|180	140|90	110|170	К пуску 1 1,2|0	 1,2|0
3	28|60	65|300	30|60	40|160	40|70	45|160	К пуску 1 1,3|50	 1,3|50
4	20|350	51|260	25|0	50|140	80|30	53|150	К пуску 3 1,0|0	 1,0|130
5	15|60	28|310	18|60	26|120	25|30	30|120	К пуску 3 1,0|270	 1,0|90

Примечание. В — вертикальная вибрация; Г — горизонтальная (поперечная); А — осевая.

вибрации больше вертикальных; по ним и будем проводить балансировку.

На диаграмме (рис. П14-12) строим векторы $A_{II} = 100|\underline{350}$ и $A_{III} = 120|\underline{50}$. Находим их полусумму $A_1' = 96|\underline{22}$ и полуразность $A_1'' = 56|\underline{280}$. Поскольку $A_1' > A_1''$, балансировку начинаем со статической составляющей неуравновешенности.

В плоскостях коррекции устанавливаем одинаковые массы под одним и тем же углом. Значения этой массы и угла ориентировочно можно выбрать по рекомендациям, изложенным в разделе М настоящего приложения. Если необходимая информация для выбора значения $m_{пр}$ отсутствует, то оно берется произвольно. В нашем случае $m_{прI} = m_{прII} 1{,}2|\underline{0}$.

При втором пуске вибрации опор существенно изменились по величине и фазе, что благоприятно отразится на результатах расчета, поскольку при этом будут использованы надежные, т. е. понижающие погрешность измерений, величины приращений.

Выделяем на диаграмме симметричную составляющую вибраций A_2' и определяем вектор приращения $\Delta A'_{1-2} = A_2' - A_1' = 90|\underline{150}$.

Требуемые корректирующие массы:

для плоскости I

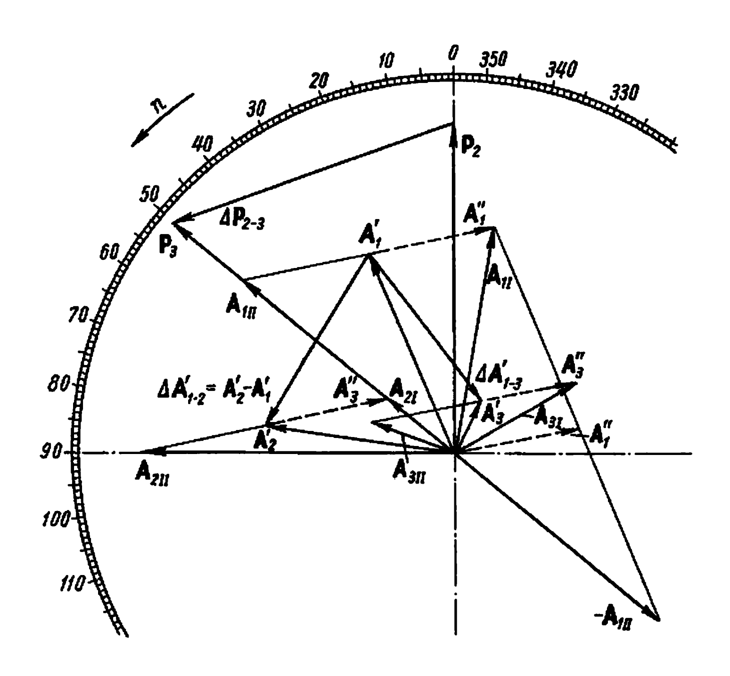


Рис. П14-12. Векторная диаграмма при балансировке по симметричным составляющим вибраций

$$m_{урI} = m_{прI} \frac{-A_1}{A_2 - A_1} = 1{,}2\underline{|0} \cdot \frac{96\underline{|22+180}}{90\underline{|150}} = 1{,}28\underline{|52};$$

для плоскости II

$$m_{урII} = m_{урI} = 1{,}28\underline{|52}.$$

Сняв пробную систему корректирующих масс, устанавливаем на ротор рассчитанную и производим третий пуск машины (табл. П14-1). Полусумма горизонтальных вибраций существенно снизилась ($A_3' = 25\underline{|333}$ — рис. П14-12), поэтому переходим к балансировке моментной составляющей неуравновешенности.

Полуразность векторов горизонтальных вибраций на исходном пуске (№ 3) равна $A_3'' = 48\underline{|281}$ (рис. П14-13). Устанавливаем на ротор пробную моментную систему грузов: две одинаковые массы, углы установки которых в плоскостях исправления отличаются на 180°:

$$m_{прI} = 1{,}0\underline{|0} \text{ и } m_{прII} = 1{,}0\underline{|180}.$$

Производим с этой парой последующий пуск (№ 4).
Приращение $\Delta A'' = A_4'' - A_3'' = 49\underline{|183}$.
Требуемые корректирующие массы:

$$m_{\text{урI}} = m_{\text{прI}} \frac{-A_3''}{A_4'' - A_3''} = 1{,}0\underline{|0} \cdot \frac{48\underline{|281 + 180}}{49\underline{|183}} = 0{,}98\underline{|278};$$

$$m_{\text{урII}} = -m_{\text{урI}} = 0{,}98\underline{|98}.$$

При установке на ротор эти массы несколько скорректированы по значению и углу установки (табл. П14-1).

При пуске ротора с рассчитанной парой масс (пуск № 5) все вибрации оказались существенно ниже нормы (60 мкм).

Таким образом, при наличии двух составляющих неуравновешенности раздельная балансировка двухопорного ротора за-

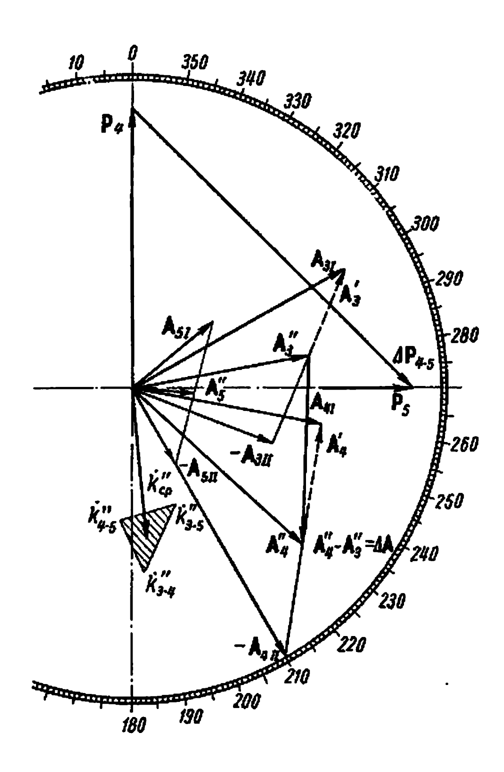


Рис. П14-13. Векторная диаграмма при балансировке по кососимметричным составляющим вибраций

нимает пять пусков, при наличии одной неуравновешенности — три пуска, как при балансировке в одной плоскости коррекции.

3. Балансировка гибких роторов. Основная трудность уравновешивания гибкого ротора состоит в том, что его нельзя сбалансировать для всех возможных частот вращения, если размещать грузы только в двух плоскостях.

В электромашиностроении к разряду гибких относятся в основном роторы турбогенераторов; их рабочая частота вращения находится между первой и второй, а у самых крупных — между второй и третьей критическими частотами вращения. Поэтому для достижения спокойного хода турбогенератора достаточно провести балансировку по двум, максимально по трем формам колебаний [4].

Балансировка производится поочередно при критических частотах вращения, лежащих ниже рабочей, и при рабочей частоте вращения. Пробные и уравновешивающие системы корректирующих масс устанавливаются не только в торцевых плоскостях, но и на бочке ротора (рис. П14-8 — заштрихованные прямоугольники). Показанные на этом рисунке системы корректирующих масс взаимно независимы, каждая из них при установке на ротор влияет лишь на свою форму колебаний, не изменяя вибраций по остальным формам. Эти системы корректирующих масс используются при балансировке в качестве пробных и уравновешивающих. Расчеты производятся по формуле (П14-22а) с выделением симметричных составляющих при балансировке по первой и третьей формам и кососимметричных составляющих при балансировке по второй форме.

Балансировка гибкого вала по этой методике обеспечивает возможность снижения вибраций до необходимого уровня во всем диапазоне частот вращения — от нуля до рабочей; однако выполнить такую балансировку можно лишь в условиях завода-изготовителя, где с целью доступа к средней части ротора балансировку производят вне статора.

Если необходимо произвести балансировку турбогенератора в собранном виде, доступными для установки грузов оказываются лишь две крайние плоскости исправления. В этом случае ротор возможно балансировать лишь симметричными и кососимметричными системами грузов, т. е. как жесткий, при одной балансировочной частоте вращения, которую обычно принимают равной рабочей.

Для роторов с $n_{\text{IIкр}} > n_{\text{раб}}$ такое уравновешивание выполнимо; если же $n_{\text{IIкр}} < n_{\text{раб}} < n_{\text{IIIкр}}$, то балансировка симметричной системой грузов при рабочей частоте вращения может повысить вибрации при первой критической частоте вращения, с чем

приходится мириться, если нет возможности перенести корректирующие массы на бочку ротора.

Отметим еще одну особенность балансировки гибких роторов: для машин некоторых типов чувствительность симметричной составляющей вибраций опор к статической системе корректирующих масс в торцевых плоскостях коррекции оказывается столь незначительной, что отбалансировать ротор грузами приемлемой величины не удается. Такие случаи имеют место у роторов, для которых так называемая нечувствительная частота вращения близка балансировочной частоте вращения или совпадает с ней; для балансировки ротора корректирующие массы приходится переносить на бочку ротора.

При переносе на бочку системы корректирующих масс какой-либо формы ее необходимо пересчитать таким образом, чтобы была сохранена достигнутая ранее сбалансированность по переносимой форме и не изменено вибрационное состояние по остальным формам. Этот расчет является весьма ответственной операцией, поскольку выемка ротора для установки корректирующих масс на бочку требует много труда и времени. Методика переноса подробно рассмотрена в работе [4].

В большинстве случаев, однако, балансировка ротора турбогенератора при рабочей частоте вращения может быть успешно выполнена установкой корректирующих масс в двух плоскостях коррекции теми же приемами, что и для жестких роторов.

Л. АНАЛИЗ БАЛАНСИРОВКИ

1. На основании приращения вибраций между пусками при балансировке ротора рассчитаем чувствительности вибраций к статической и моментной системам грузов. Эти чувствительности принято относить к одному из грузов, входящих в систему. Расчеты производятся по формуле (П14-23) и сведены в табл. П14-2. Приращения вибраций $\Delta A'$ и $\Delta A''$ взяты из век-

Таблица П14-2

Симметричные составляющие вибраций				Кососимметричные составляющие вибраций			
№ пуска	$\Delta A'$, мкм$\angle ...°$	$\Delta m'$, кг$\angle ...°$	$\dot{k}'$, $\frac{мкм}{кг}\angle ...°$	№ пуска	$\Delta A''$, мкм$\angle ...°$	$\Delta m''$, кг$\angle ...°$	$\dot{k}''$, $\frac{мкм}{кг}\angle ...°$
1—2	$90\angle 150$	$1{,}2\angle 0$	$75\angle 150$	3—4	$49\angle 183$	$1{,}0\angle 0$	$49\angle 183$
1—3	$80\angle 215$	$1{,}3\angle 50$	$61\angle 165$	3—5	$32\angle 110$	$1{,}0\angle 270$	$32\angle 200$
2—3	$96\angle 275$	$1{,}1\angle 110$	$87\angle 165$	4—5	$50\angle 40$	$1{,}4\angle 225$	$35\angle 175$

торных диаграмм на рис. П14-12 и П14-13. Средние значения чувствительностей: к статике $\dot{k}'=74\underline{|160}$, к паре $\dot{k}''=39\underline{|186}$.

На рис. П14-13 показано, что, несмотря на имеющийся разброс, значения чувствительности $\dot{k}$ находятся в зоне небольшого заштрихованного треугольника, что и позволяет нам осреднить их. Разброс чувствительностей возможен не только из-за неизбежных погрешностей при измерениях вибраций и установке корректирующих масс, но также и из-за нелинейных зависимостей между вибрациями и дисбалансом, из-за нестабильности вибраций ротора вследствие неодинаковых условий проведения исходного и последующих пусков (например, по температуре масла в подшипнике) и других причин.

Если в процессе балансировки оказывается, что значения чувствительности для последовательных шагов балансировки существенно отличаются друг от друга, то следует найти и устранить причину этой нестабильности и лишь затем продолжать балансировку.

При балансировке другой машины того же типа наличие чувствительности позволит перед началом балансировки рассчитать по формуле (П14-24) пробную систему корректирующих масс; она будет мало отличаться от требуемой, в связи с чем необходимое для балансировки число пусков уменьшится.

2. Наличие чувствительностей $\dot{k}'$ и $\dot{k}''$ позволит также начать раздельную балансировку с той составляющей, которая больше по величине. Целесообразность такой последовательности объясняется тем, что в этом случае при последующей балансировке другой составляющей будут устранены также погрешности, вызванные неточностью установки больших корректирующих масс по первой составляющей, связанные обычно с тем, что массы, устанавливаемые с обеих сторон, часто неодинаковы и не вполне совпадают осевые плоскости их установки.

3. Чувствительность к статике оказалась в 74/39 = 1,9 раза выше чувствительности к паре. Подобное соотношение типично для жестких роторов и объясняется тем, что для них первая критическая частота вращения находится ближе к рабочей, чем вторая, а следовательно, статическая неуравновешенность сильнее сказывается на вибрации опор, чем динамическая.

4. Следует обратить внимание на следующее: на рис. П14-12 и П14-13 выделены штриховыми линиями те составляющие вибраций, по которым при данном цикле пусков балансировка не производится. Эти векторы приблизительно сохраняют постоянство по величине и направлению. В этом и состоит свойство взаимонезависимости статического и динамического дисбалансов, о котором говорилось выше.

М. БАЛАНСИРОВКА ВАЛОПРОВОДОВ АГРЕГАТОВ

Если при соединении валов электрических машин применена гибкая муфта, то каждая из машин агрегата может быть сбалансирована по вибрациям своих опор.

Если для соединения роторов применены жесткие муфты, то вследствие взаимного влияния неуравновешенностей балансировка каждого ротора в отдельности становится затруднительной.

Валопровод агрегата, симметричного относительно средней поперечной плоскости, можно эффективно отбалансировать, если его роторы, соединенные посредством жестких муфт, рассматривать как один валопровод, формы прогиба которого в зависимости от динамических характеристик системы будут иметь вид в соответствии с рис. П14-7 или П14-8.

Не требует пояснений, что в первом случае статическая составляющая неуравновешенностей всего валопровода будет восприниматься в основном внутренними опорами, тогда как динамическая — крайними, вследствие чего балансировку суммарного статического дисбаланса целесообразно производить по полусумме вибраций средних опор, а балансировку суммарного динамического дисбаланса — по полуразностям вибраций крайних опор.

Если валопровод агрегата оказывается гибким, то балансировка его должна производиться путем установки в плоскостях коррекции систем корректирующих масс, симметричных относительно середины агрегата, с раздельным анализом приращений вибраций на средних и крайних опорах. Тем самым методика балансировки многоопорного агрегата сводится к той же методике раздельного снижения составляющих неуравновешенности, применяемой для одиночных роторов.

П р и м е р. На рис. П14-14, *а* представлена схема крупного агрегата, валопровод которого состоит из трех роторов, соединенных жесткими муфтами, и опирается на четыре опоры. Рабочая частота вращения 1000 об/мин. Для установки корректирующих масс можно использовать шесть плоскостей исправления.

В табл. П14-3 приведен протокол балансировки этого агрегата; горизонтальные вибрации опор в несколько раз превышали вертикальные, поэтому последние в протоколе не приводятся.

На исходном пуске агрегата распределение вибраций оказалось таким, что как на средних, так и на крайних опорах превалировали симметричные составляющие колебаний, плоскости которых не совпали. При данной конструктивной схеме агрегата для установки статической системы корректирующих масс было целесообразно воспользоваться плоскостями *C* и *D*. При пуске

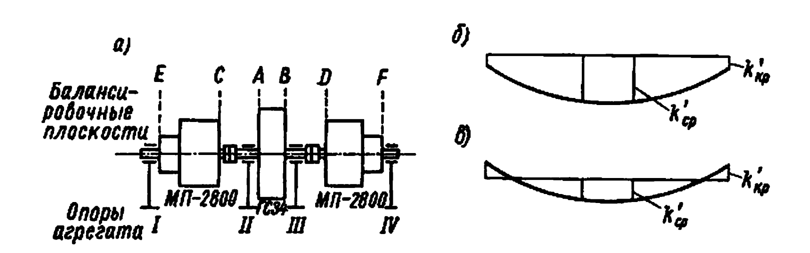


Рис. П14-14. Схема трехроторного агрегата (*а*) и формы прогиба при установке корректирующих масс в средние (*б*) и крайние (*в*) плоскости

№ 2 в эти плоскости и была установлена система корректирующих масс по 0,5 кг под одним и тем же углом 250°.

По результатам первого и второго пусков на рис. П14-15 построены векторы полусумм вибраций средних опор — $\mathbf{A}'_1$ и $\mathbf{A}'_2$ и определено приращение $\mathbf{A}'_2-\mathbf{A}'_1=80\lfloor\underline{180}$.

Требуемые корректирующие массы в плоскостях *C* и *D*:

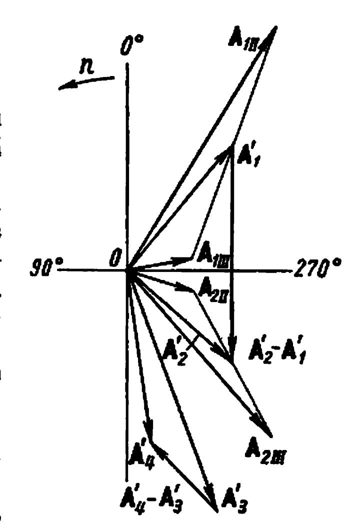
$$\mathbf{m}_{ур}=\mathbf{m}_{пр}\frac{-\mathbf{A}'_1}{\mathbf{A}'_2-\mathbf{A}'_1}=0{,}5\cdot 250\cdot\frac{60\lfloor\underline{322+180}}{80\lfloor\underline{180}}=0{,}38\lfloor\underline{212}.$$

Из-за отсутствия подходящих масс третий пуск был произведен с системой, несколько отличной от расчетной (табл. П14-3).

Вибрации средних опор существенно снизились, а крайних — остались без изменения. Поэтому следующий пуск (№ 4) был выполнен с пробной статической системой корректирующих масс в плоскостях *E* и *F*, ближних к крайним опорам. Расчетный

№ пуска	Горизонтальные вибрации опор, мкм⌊...°				Векторы	
	I	II	III	IV	*E*	
1	80⌊230	104⌊330	21⌊280	110⌊180	—	
2	80⌊200	25⌊250	76⌊220	130⌊200	—	
3	80⌊200	12⌊—	17⌊—	100⌊200	—	
4	60⌊200	40⌊230	52⌊230	60⌊180	0,6⌊330	
5	30⌊150	42⌊210	120⌊230	46⌊210	1,5⌊345	
6	72⌊210	270⌊320	330⌊310	27⌊260	—	
7	15⌊—	61⌊320	70⌊310	23⌊130	—	
8	19⌊—	41⌊310	45⌊290	42⌊130	—	

Рис. П14-15. Векторная диаграмма при балансировке агрегата



треугольник полусумм вибраций крайних опор — треугольник $OA'_3A'_4$ (рис. П14-15).

На пятом пуске с расчетной системой корректирующих масс в плоскостях *E* и *F* вибрации крайних опор снизились в 2—2,5 раза, однако вибрации средних опор возросли в большее число раз. По-прежнему в них превалировала симметричная составляющая.

На последующем пуске (№ 6) была опробована установка статической системы в плоскостях *A* и *B*. Вибрации средних опор оказались настолько чувствительными к этой системе, что пробные корректирующие массы по 0,8 кг на сторону оказались слишком большими. Рассчитанную уравновешивающую систему пришлось скорректировать дополнительным пуском (№ 8), после чего вибрации всех опор стали ниже нормы и балансировка была закончена.

В табл. П14-4 приведены значения комплексов чувствительностей, рассчитанные по результатам балансировки для всех случаев попарной установки симметричной системы корректирующих масс. Анализ их обнаруживает следующие соотношения:

1. От установки корректирующих масс на внутренние плоскости (*A* и *B* или *C* и *D*) чувствительность к статической

Таблица П14-3

корректирующих масс, кг|...°, в плоскостях					
	C	A	B	D	F
	—	—	—	—	—
	0,5|250	К пуску 1		0,5|250	—
	0,5|215	К пуску 1		0,5|215	—
	—	К пуску 3		—	0,6|330
	—	К пуску 3		—	1,5|345
	—	К пуску 5		—	—
		0,8|20	0,8|20		
	—	0,3|100	0,3|100	—	—
	—	0,25|120	0,25|120	—	—

Таблица П14-4

Плоскости установки статической системы корректирующих масс	Чувствительность, $\frac{мкм}{кг}\underline{\lfloor...^{\circ}}$		
	$\dot{k}'_{ср}$	$\dot{k}'_{кр}$	$\dot{k}'_{ср}/\dot{k}'_{кр}$
A и *B*	$330\underline{\lfloor 280}$	$50\underline{\lfloor 260}$	6,6
C и *D*	$130\underline{\lfloor 285}$	$20\underline{\lfloor 275}$	6,5
E и *F*	$40\underline{\lfloor 260}$	$50\underline{\lfloor 50}$	0,8

системе корректирующих масс для средних опор $\dot{k}'_{ср}$ оказывается в 6,5 раза выше, чем для крайних опор $\dot{k}'_{кр}$. Аргументы комплексов чувствительностей примерно совпадают, вследствие чего форма прогиба имеет вид в соответствии с рис. П14-14, *б*, т. е. валопровод изгибается по первой форме.

2. От установки корректирующих масс в крайних плоскостях *E* и *F* чувствительности $\dot{k}'_{ср}$ и $\dot{k}'_{кр}$ близки по величине, а их аргументы отличаются примерно на 180°, вследствие чего форма прогиба, которую принимает валопровод при установке симметричной системы корректирующих масс в крайние плоскости, имеет вид в соответствии с рис. П14-14, *в*, т. е. валопровод изгибается по третьей форме.

До начала балансировки эти результаты трудно предвидеть. Определение чувствительностей и их анализ в процессе балансировки позволяют в сложных случаях по ходу балансировки вносить коррективы и довести ее до конца.

Как видим, балансировка данного агрегата потребовала восьми пусков, тогда как при балансировке одной формы неуравновешенности одиночного ротора достаточно трех-четырех пусков. Балансировка многоопорных валопроводов, формы прогибов которых заранее неизвестны, является одной из наиболее тонких и сложных задач, особенно в случае, когда агрегат не имеет поперечной плоскости симметрии (например, валопровод турбоагрегата).

Н. ВЫБОР И УСТАНОВКА ПРОБНОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ МАССЫ

Весьма ответственным является выбор пробной корректирующей массы. Теоретически эта масса и угол ее установки могут быть произвольными. Практически, однако, неудачный выбор их может привести к потере пуска; например, слишком большая

пробная корректирующая масса, если она совпадет с исходным дисбалансом, может вызвать такое увеличение вибраций, которое не позволит довести частоту вращения ротора до балансировочной. Если пробная корректирующая масса слишком мала, то вызванное ею приращение вибраций будет соизмеримо с погрешностями измерений, что также не позволит правильно рассчитать необходимую корректирующую массу. В обоих случаях пробный пуск придется повторить.

Для того чтобы расчет требуемой системы корректирующих масс по формуле (П14-22а) имел наименьшую погрешность, приращение вибраций от пробной системы должно быть соизмеримо с исходной вибрацией. Для этого нужно предварительно, хотя бы ориентировочно, оценить исходный дисбаланс. Наиболее точно можно определить пробную систему по чувствительности, полученной в результате проведенных ранее балансировок аналогичных машин [см. формулы (П14-23) и (П14-24)].

Если чувствительность неизвестна, то сугубо ориентировочно ее можно подсчитать по следующей эмпирической формуле:

$$k=\frac{10r}{M}\left(\frac{n}{3000}\right)^2, \qquad (П14\text{-}26)$$

где k — *модуль балансировочной чувствительности полусумм* или полуразностей вибраций опор к корректирующей массе, входящей в симметричную или кососимметричную систему, мкм/кг; r — радиус установки корректирующей массы, мм; M — масса ротора, т.

Более точный расчет требует, как показано в п. Д, знания динамических характеристик балансируемой системы.

При удачной установке пробной корректирующей массы (напротив дисбаланса) вибрации опор снизятся и ротор может оказаться отбалансированным по одной из форм дисбаланса уже на втором пуске. Если угол установки пробной корректирующей массы совпадет с исходным дисбалансом, то при расчете требуемой системы корректирующих масс не исключено появление дополнительной погрешности вследствие нарушения линейной зависимости между вибрацией и возмущающей силой из-за значительного приращения последней. Поэтому следует стремиться так установить пробную корректирующую массу, чтобы она была расположена относительно дисбаланса под углом, по крайней мере не меньшим 90°.

Иногда хорошую информацию о расположении дисбаланса на роторе можно получить с помощью карандашной отметки на валу: при частотах вращения ниже критической середина отметки совпадает с местом дисбаланса, при частотах вращения выше критической находится против дисбаланса, а при кри-

тической частоте вращения отстает от дисбаланса на 90°. Не всегда, однако, можно нанести отметку на ротор; кроме того, чтобы отметка получилась четкой, балансировщик должен иметь большой навык.

Измеренная балансировочным прибором фаза вибраций опор определенным образом связана с дисбалансом ротора:

$$\varphi_{изм} = \varphi_{дис} + \varphi_{мех} + \varphi_{ап} + \varphi_0, \qquad (П14\text{-}27)$$

где $\varphi_{дис}$ — угол дисбаланса, отсчитанный от начального радиуса в направлении угловой разметки ротора; $\varphi_{мех}$ — угловая поправка, учитывающая сдвиг фаз между возмущающей силой, вызываемой дисбалансом, и вибрационным смещением в механической системе «ротор — опоры»; $\varphi_{мех} = 360° - \varphi$, где φ берется по кривой рис. П14-6, *б* для $D = 0{,}1$; $\varphi_{ап}$ — угловая поправка, связанная со сдвигом фаз в применяемой аппаратуре. Она входит в комплект документации используемого прибора и относится к стробоскопическому способу измерения фаз. Например, для прибора БИП-5 $\varphi_{ап}$ берется по кривой рис. П14-16; φ_0 — угол между направлением измеряемой вибрации и нулевым радиусом неподвижной шкалы для отсчета фазы по стробоскопу. Берется прямо по этой шкале. (Для вертикальных вибраций $\varphi_0 = 0$, для горизонтальных 90° или 270°.)

Из выражения (П14-27) получаем следующее выражение для углового положения дисбаланса:

$$\varphi_{дис} = \varphi_{изм} - (\varphi_{мех} + \varphi_{ап} + \varphi_0). \qquad (П14\text{-}28)$$

Пример. Уравновешивается ротор массой $M = 10$ т; номинальная частота вращения $n = 2250$ об/мин. Точное значение критической частоты вращения неизвестно, но машина относится к классу жестких (полагаем $n_{раб}/n_c = 0{,}5$). Радиус расположения грузов $r = 400$ мм.

Вертикальные вибрации опор на исходном пуске:

$$A_1 = 100\,\underline{|120}\,; \quad A_2 = 120\,\underline{|150}\,.$$

Балансировка производится с помощью прибора БИП-5. Требуется определить вектор пробной симметричной системы грузов.

Рис. П14-16. Угловая поправка для прибора БИП-5

Рассчитываем чувствительность по формуле (П14-27):

$$k=\frac{10r}{M}\left(\frac{n}{3000}\right)^2=\frac{10\cdot 400}{10}(0{,}75)^2=225 \text{ мкм/кг.}$$

Угловые поправки: по рис. П14-6, *б* для $n_{раб}/n_c=0{,}5$ значения $\varphi=10°$; $\varphi_{мех}=360-10=350°$; по рис. П14-16 — для $n=2250$ об/мин $\varphi_{ап}\approx 0$; для вертикальной вибрации $\varphi=0$.

Полусумма вибраций опор

$$A'=\frac{A_1+A_2}{2}=106\underline{|136}.$$

Пробная корректирующая масса, входящая в статическую систему:

$$m_{пр}=106/225=0{,}47 \text{ кг.}$$

Угол установки пробной системы по формуле (П14-28)

$$\varphi_{ур}=\varphi+180°=136-(350+0+0)+180=326°.$$

Вектор $m_{пр}\approx 0{,}5\underline{|330}$.

Как видим, даже для ориентировочного определения пробной корректирующей массы необходимо располагать различными характеристиками балансируемой машины и используемого прибора, поэтому производить эти расчеты целесообразно лишь в том случае, когда каждый пуск машины связан с большими затратами труда и времени. В противном случае целесообразнее в процессе балансировки пойти на два-три дополнительных пуска.

О. ДИНАМИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА С ИЗМЕРЕНИЕМ ТОЛЬКО РАЗМАХА ВИБРАЦИИ

Иногда приходится заниматься динамической балансировкой ротора машины, когда нет возможности измерять фазу вибраций. Это случается, например, при балансировке тихоходных машин, частота вращения которых лежит значительно ниже рабочего диапазона балансировочных приборов; размах колебаний опор в этом случае может быть с достаточной точностью измерен с помощью индикатора, тогда как фазу измерить не удается.

В простых случаях, например когда требуется произвести балансировку в одной плоскости коррекции, наличие одного лишь измерителя размаха вибрации позволяет, хотя и за большее число пусков, довести балансировку до требуемого результата.

Ниже рассмотрены два способа осуществления такой балансировки:

1. Балансировка в одной плоскости коррекции методом обхода.

2. Балансировка в одной плоскости коррекции методом двух-трех пусков.

В случае если без измерителя фаз вибраций нужно сбалансировать ротор с установкой корректирующих масс в двух плоскостях коррекции, то балансировка производится последовательным чередованием циклов балансировки в одной плоскости коррекции сначала с одной стороны ротора, а затем с другой. Число пусков, требуемых для уравновешивания, при этом существенно возрастает.

1. Балансировка методом обхода. Для ее осуществления сначала измеряют вибрацию при исходном пуске ротора. Затем при одной и той же балансировочной частоте вращения производят пуски ротора с установкой одной и той же пробной корректирующей массы в нескольких точках окружности на плоскости коррекции. Обычно при этом пробную корректирующую массу переставляют через равные угловые промежутки (рис. П14-17, *а*), хотя принципиально последние могут быть и неодинаковы.

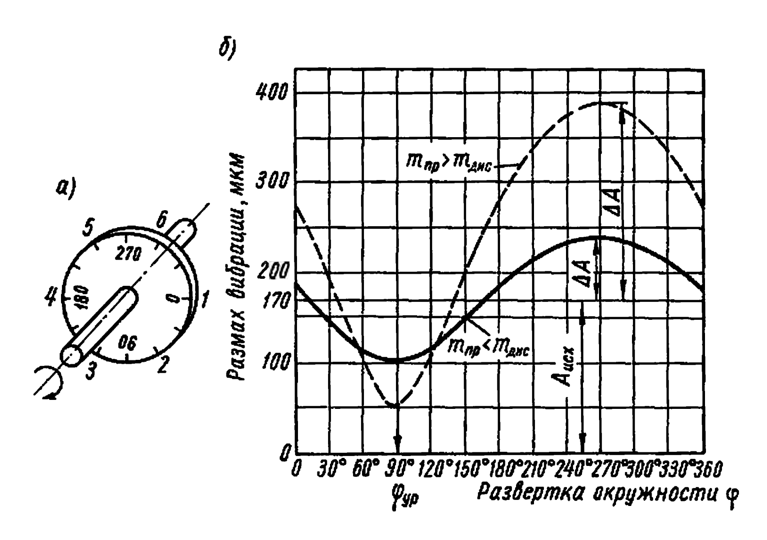


Рис. П14-17. Балансировка методом обхода пробной корректирующей массой: *а* — разметка окружности на плоскости коррекции; *б* — вибрация подшипника в зависимости от положения пробной корректирующей массы

1, 2, 3, ... — места установки

По результатам измерений строится график зависимости вибраций от углового положения корректирующей массы на роторе $A = f(\varphi_{ур})$. Эта кривая имеет различную форму, зависящую от соотношения пробной корректирующей массы и исходного дисбаланса (рис. П14-17, *б*). На графике проводится прямая, параллельная оси абсцисс, соответствующая исходной вибрации $A_{исх}$.

Для определения массы дисбаланса используется приращение ΔA, равное разности наибольшего и исходного значений вибраций.

Требуемая корректирующая масса рассчитывается по формуле

$$m_{ур} = m_{пр} \frac{A_{исх}}{\Delta A}. \qquad (П14\text{-}29)$$

Угол установки этой корректирующей массы в плоскости коррекции $\varphi_{ур}$ соответствует наименьшей вибрации на графике.

Число точек при обходе плоскости коррекции может быть любым; чем их больше, тем точнее будет определен вектор $\mathbf{m}_{ур}$, но придется делать больше пусков. Не следует принимать число пусков с пробной массой меньше шести.

Пример. Балансируется маховик, исходная вибрация 170 мкм. С установкой корректирующей массы $m_{пр} = 15$ кг произведен обход в плоскости коррекции через 60°. Значения размахов вибраций:

Угловое положение массы, ...°	0	60	120	180	240	300
Размах вибраций, мкм	185	120	120	185	230	230

Из графика на рис. П14-17, *б* (сплошная кривая) находим $\Delta A = 70$ мкм, $\varphi_{ур} = 90°$. Получаем

$$m_{ур} = 15 \frac{170}{70} = 36{,}5 \text{ кг}.$$

При установке корректирующей массы $\mathbf{m}_{ур} = 36\underline{|90}$ вибрация снизилась до 30 мкм.

2. Балансировка методом двух-трех установок пробной корректирующей массы. При балансировке по этому способу производится исходный пуск ротора без корректирующей массы, пуск с пробной корректирующей массой $\mathbf{m}_{пр1} = m_{пр}\underline{|\varphi_{пр1}}$ и пуск с той же массой, но сдвинутой на 180° относительно первого положения: $\mathbf{m}_{пр2} = m_{пр}\underline{|\varphi_{пр2}}$; $\varphi_{пр2} = \varphi_{пр1} + 180°$.

Размахи вибраций, измеренные при этих пусках: $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$.

На отрезке прямой ab, равном в определенном масштабе $2A_0$, строим треугольник acb, стороны которого в том же масштабе равны A_1 и A_2 (рис. П14-18, *а*).

Вектор $A_{пр}$, изображаемый медианой dc этого треугольника, в том же масштабе будет равен приращению вибраций от пробной корректирующей массы. Действительно, если повернуть $\triangle cdb$ вокруг точки d на 180° (рис. П14-18, *б*), векторы исходной вибрации A_0 совпадут, а векторы приращения вибраций при первом и втором пусках расположатся относительно друг друга под углом 180°, что и соответствует перемещению пробной корректирующей массы на роторе при первом и втором пусках.

В нашем примере: $A_0=120$ мкм; $A_1=180$ мкм; $A_2=$ $=120$ мкм; $m_{пр1}=0{,}22\underline{|60}$; $m_{пр2}=0{,}22\underline{|240}$.

Из диаграммы на рис. П14-18, *а* находим $A_{пр}=96$ мкм, углы поворота пробной корректирующей массы до ее совпадения с вектором $-A_0$: $\varphi_1=112°$; $\varphi_2=-68°$. Масса

$$m_{ур}=\frac{A_0}{A_{пр}}m_{пр}=\frac{120}{96}\cdot 0{,}22=0{,}28 \text{ кг}.$$

Угол установки требуемой корректирующей массы $\varphi_{ур}=$ $=\varphi_{пр1}+\varphi_1=60+112=172°$ или же из второго треугольника $\varphi_{ур}=\varphi_{пр2}+\varphi_2=240-68=172°$.

Однако приведенный результат не является однозначным, поскольку построение треугольника по трем сторонам дает нам второе решение — треугольник abc', изображенный на рис. П14-18, *а* штриховыми линиями. При этом величина вектора $A_{пр}$ остается неизменной, но углы поворота вектора пробной корректирующей массы будут иными: $\varphi_1=-112°$, $\varphi_2=68°$.

Соответственно требуемая корректирующая масса останет-

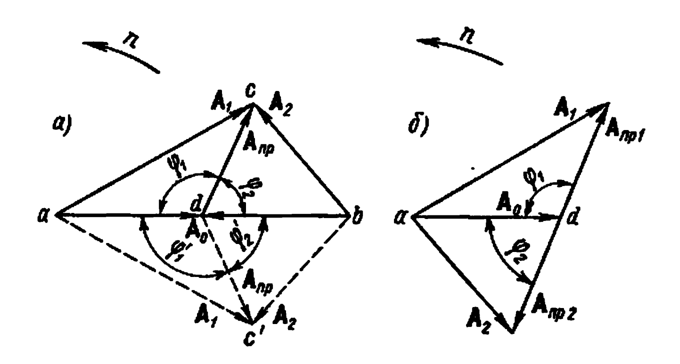


Рис. П14-18. Диаграмма при балансировке по методу двух-трех пусков без измерения фаз вибраций

ся той же, а угол установки изменится: $\varphi_{ур}=\varphi_{пр1}+\varphi_1=60-$ $-112=308°$.

Какой из двух найденных $\varphi_{ур}$ является истинным, приходится решать дополнительным пуском: в случае если при установке $m_{ур}$ на один из найденных углов вибрация возрастет, груз следует переставить на второй угол.

П. КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МАССЫ

В пунктах Ж и И показано, что в зависимости от динамических характеристик системы «ротор — опоры» требуется различное число плоскостей коррекции при балансировке ротора. Поэтому конструкцией машины обычно предусматриваются места установки, тип и способ крепления корректирующих масс.

На торцах различных узлов роторов и якорей (центрирующие кольца, вентиляторы, коллекторы и т. д.) применяют, например, кольцевые канавки трапециевидного сечения для корректирующих масс типов БГI, БГII и БГIII, показанных на рис. П14-19 (по отраслевой нормали № ОАА.692.000—62). Данные этих корректирующих масс и канавок для них приведены в табл. П14-5.

Разрезная корректирующая масса не требует для установки специального выреза в стенках канавки. Применение таких масс удобно для балансировщика, однако их недостатком является требуемая для надежности крепления довольно высокая точность механической обработки.

На рис. П14-20 показана накладная корректирующая масса *2*, прикрепляемая к ротору *1* болтами *3* с головками трапе-

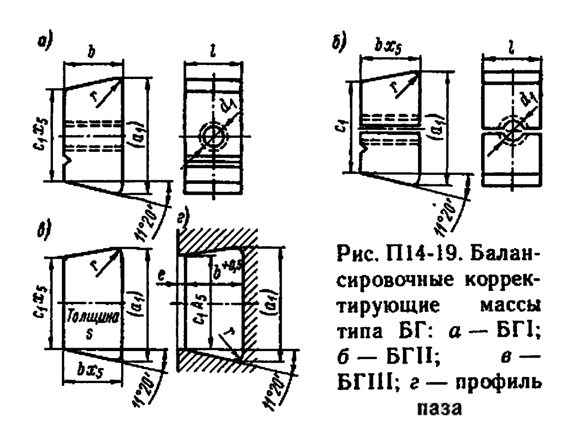


Рис. П14-19. Балансировочные корректирующие массы типа БГ: *а* — БГI; *б* — БГII; *в* — БГIII; *г* — профиль паза

Таблица П14-5

Размеры корректирующих масс и паза, мм								Масса заготовки профиля БГ для корректирующих масс, кг/м	
БГI, БГII, БГIII и паз				БГI и БГII		БГIII	Паз		
(a_1)	b	c_1	r	$l \pm 0{,}2$	d_1	s	e	Сталь Ст3	Дюралюминий Д16
10	8	6,80	2,5	8	М5	1,5	1	0,66	0,24
12	9	8,40		9	М6			0,86	0,31
15	10	11		10		2		1,02	0,37
21	12	15,2	3	12				1,46	0,52
26		21,2			М8		2	1,85	0,66
31 36	15	25 30		15				2,20 2,58	0,78 0,92
41 50	18 24	33,8 40,4		18 24	М10 М12	3		2,94 3,54	1,05 1,26

циевидного профиля, гайкой *4* и стопорной шайбой *5*. В крупных турбогенераторах, помимо показанных канавок для корректирующих масс БГ, предусматриваются резьбовые отверстия в пазовых клиньях для балансировочных пробок (при косвенном охлаждении обмоток). При непосредственном охлаждении резьбовые отверстия для пробок делают в больших зубцах.

Помимо рассмотренных унифицированных конструкций корректирующих масс, в машинах применяются плоские стальные корректирующие массы различной формы, которые устанавливаются внутри роторных и якорных звезд или на их торцах. Если эти корректирующие массы не привариваются, то их устанавливают с упором в специально предусмотренные выточки и надежно прикрепляют болтами со средствами против самоотвинчивания.

В исключительных случаях, когда корректирующую массу нельзя установить с упором, нормальная затяжка болтов должна обеспечивать силу трения между болтом и вращающимся телом, превышающую



Рис. П14-20. Накладная корректирующая масса

центробежную силу, вызываемую вращающейся корректирующей массой, т. е.

$$mr\omega^2 \leqslant fks\sigma_р, \qquad \text{(П14-30)}$$

где m — корректирующая масса, кг; r — расстояние центра массы от оси вращения, м; f — коэффициент трения стали по стали; k — число болтов; s — площадь сечения стержня болта, см^2; $\sigma_р$ — допускаемое напряжение на растяжение, Н/см^2.

При $f=0,3$ и $\sigma_р \approx 10^4$ Н/см^2 необходимая площадь сечения болта (в квадратных сантиметрах) определяется формулой

$$s \geqslant \frac{33mr}{k}\left(\frac{n}{3000}\right)^2. \qquad \text{(П14-31)}$$

Если сечение удовлетворяет этой формуле, то болт проверять на срез не нужно, так как $\sigma_{ср} \approx 0,6\sigma_р$.

Пример. Корректирующая масса $m=35,4$ кг; $r=0,7$ м; $n=375$ об/мин; $k=4$. Определить размер болтов для крепления.

Площадь сечения стержня болта

$$s=\frac{33mr}{k}\left(\frac{n}{3000}\right)^2=\frac{33\cdot 35,4\cdot 0,7}{4}\left(\frac{375}{3000}\right)^2=3,2 \text{ см}^2.$$

Диаметр стержня болта $d=\sqrt{3,2\cdot 10^2/0,785}=20,2$ мм.

По ГОСТ 9150—81 принимаем болты М24.

После окончания балансировки временные корректирующие массы должны быть заменены постоянными.

Приварка корректирующих масс допускается только в местах, недоступных для персонала эксплуатации. Доступные корректирующие массы должны быть съемными, что позволяет более удобно устанавливать дополнительные корректирующие массы при подбалансировках ротора (якоря) в процессе дальнейшей эксплуатации.

Временные и постоянные корректирующие массы нужно устанавливать только в местах, предусмотренных конструкцией машины.

Нередко корректирующие массы расположены на большой дуге окружности. Так как такое размещение их малоэффективно и загромождает плоскость коррекции, то распределенные корректирующие массы целесообразно заменять по возможности сосредоточенной корректирующей массой, значение и угловое расположение которой определяются геометрическим сложением отдельных корректирующих масс, рассматриваемых как векторы.

При необходимости переноса в том же радиальном направлении корректирующей массы m_1, центр которой находится на расстоянии r_1 от оси вращения, ее нужно заменить массой

$$m_2 = m_1 \frac{r_1}{r_2}, \qquad (П14\text{-}32)$$

где r_2 — расстояние центра этой массы от оси вращения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

ВЫБОР СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Для смазки подшипников следует всегда применять масло, рекомендуемое заводом — изготовителем машины; особенно это относится к крупным машинам. Качество применяемого масла должно соответствовать нормам и подлежит проверке в лаборатории. Если указания завода-изготовителя отсутствуют, то при выборе марки масла для данной машины руководствуются приводимыми ниже соображениями.

Как известно, основным назначением смазки является создание жидкостного трения, которое возможно при определенном давлении в смазочном слое. Последнее же при прочих одинаковых условиях пропорционально вязкости масла и окружной скорости шейки вала. При больших окружных скоростях требуемое давление может быть создано при меньшей вязкости масла,

Наименование показателя	Масло индустриальное			
	И-12А		И-20А	
	Высший сорт	Первый сорт	Высший сорт	
Кинематическая вязкость, мм²/с, при 50 °С	10—14		17—23	
Коксуемость, %, не более	—	—	—	
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,02	0,05	0,03	
Зольность, %, не более	0,005			
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствуют			
Содержание механических примесей	То же			
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	170	165	200	
Температура застывания, °С, не выше	—30		—15	

наоборот, при малых окружных скоростях — при большей вязкости масла. Кроме того, следует также учитывать и режим работы машины. Так, например, при частых пусках и реверсах применяют более вязкое масло, так как в этом случае сокращается период полужидкостного трения, что связано с малой частотой вращения и остановками.

Более вязкое масло благоприятствует образованию масляного клина, т. е. при одних и тех же условиях при более вязком масле жидкостное трение наступает при меньшей частоте вращения.

При выборе масла для подшипников следует учитывать нагрузку на них (удельное давление) и температуру окружающей среды: чем больше нагрузка на подшипник и чем выше температура среды, тем масло должно быть более вязким. Необходимо также учесть, что применять более вязкое масло, чем это необходимо, не следует, так как при этом увеличиваются потери на трение, пропорциональные вязкости масла. Таким образом, основным свойством, определяющим пригодность масла для различных машин при заданных условиях работы, является его вязкость.

Физико-химические свойства масел, применяемых для подшипников скольжения электрических машин, приводятся в табл. П15-1, где наряду с вязкостью указаны и прочие показатели, характеризующие качество масел. Ориентировочные данные, необходимые при выборе сорта масла для машин мощ-

Таблица П15-1

	по ГОСТ 20799—75				Масло турбинное по ГОСТ 32—74	
	И-20А	И-30А	И-40А			
	Первый сорт	Первый сорт	Высший сорт	Первый сорт	T_{22}	T_{30}
	17—23	28—33	35—45		20—23	28—32
	—	0,15			—	—
	0,05				0,02	
	0,005					
	Отсутствуют					
	То же					
	180	190	230	200	180	
	—15					—10

Таблица П15-2

Частота вращения и режим работы машины	Машины мощностью 100—1000 кВт		Машины мощностью свыше 1000 кВт	
	Вязкость, мм^2/с	Сорт масел	Вязкость, мм^2/с	Сорт масел
От 1000 об/мин и выше:				
нереверсивные и с редкими пусками	17—23	Индустриальное И-20А	17—23	Индустриальное И-20А
реверсивные и с частыми пусками	28—33	Индустриальное И-30А	28—33	Индустриальное И-30А
От 250 до 1000 об/мин:				
нереверсивные и с редкими пусками	28—33	Индустриальное И-30А	28—33	Индустриальное И-30А
реверсивные и с частыми пусками	28—33	Индустриальное И-30А	35—45	Индустриальное И-40А
До 250 об/мин, нереверсивные и реверсивные	35—45	Индустриальное И-40А	35—45	Индустриальное И-40А

Таблица П15-3

Вязкость смеси масел, мм^2/с	Сорта смешиваемых масел	Пропорции смешиваемых сортов в частях
20	1. Индустриальное И-12А	1
	Индустриальное И-30А	2
	2. Индустриальное И-12А	11
	Индустриальное И-45А	9
30	1. Индустриальное И-12А	3
	Индустриальное И-45А	7
	2. Индустриальное И-20А	1
	Индустриальное И-45А	1
	3. Индустриальное И-20А	2
	Моторное М-10Б	1
45	1. Индустриальное И-12А	1
	Моторное М-10Б	6
	2. Индустриальное И-30А	2
	Моторное М-10Б	3

Наименование смазки	Состав	Эффективная вязкость при 0 °C и среднем градиенте скорости деформации 10 $с^{-1}$, Па·с, не более	Предел прочности на сдвиг, Па ($гс/см^2$), не менее	Содержание воды, %, не более	Содержание механических примесей, %, не более	Содержание свободных щелочей в пересчете на NaOH, %, не более
Смазка ВНИИ НП-242 по ГОСТ 20421—75	По ГОСТ 20421—75	5000 (по ГОСТ 7163—84)	1,0 при 80 °C	Отсутствует	—	0,15
Универсальная среднеплавкая, водостойкая по ГОСТ 4366—76:	По ГОСТ 4366—76	По ГОСТ 7163—84				
пресс-солидол «С»		1000	98 (1,0) при 50 °C	3	0,25	0,2
солидол «С»		2000	196 (2,0) при 50 °C	3	0,3	0,2
Пластическая смазка ЭШ 176 по ТУ 38-1-01-96-70	По ТУ 38-1-01-96-70	Не менее 40 при 50 °C	2,5	Следы	—	0,15

ностью от 100 кВт и выше с кольцевой смазкой, приведены в табл. П15-2, где указаны вязкость при 50 °C и рекомендуемый сорт масла. Для машин с кольцевой смазкой малой мощности (до 100 кВт) всех типов независимо от быстроходности и характера работы может применяться масло с вязкостью 17—23 $мм^2/с$ при 50 °C. Требуемой в данном случае вязкостью обладает масло И-20А.

Для подшипников с циркуляционной смазкой применяются главным образом турбинные масла, причем для подшипников

быстроходных машин с частотой вращения от 1000 об/мин и выше — турбинное $Т_{22}$, а для подшипников машин с частотой вращения 250—1000 об/мин — турбинное $Т_{30}$. Для смазки подшипников турбогенераторов применяется то же масло, что и для подшипников турбин.

Масло необходимой вязкости можно получить путем смешивания различных сортов. В табл. П15-3 указаны пропорции различных масел для составления смеси определенной вязкости. Меняя соотношение частей смеси, можно получить вязкости масел, отличающиеся от указанных в таблице.

Смазки, рекомендуемые для подшипников качения электрических машин, приведены в табл. П15-4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

ДОПУСТИМЫЕ ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

(Извлечение из ГОСТ 183—74; 533—85 Е; 5616—81 Е; 11677—85)

А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Предельные допустимые температуры частей электрических машин при температуре газообразной охлаждающей среды 40 °С и высоте над уровнем моря не более 1000 м, если они не указаны в стандартах на отдельные виды машин, приведены в табл. П16-1 в соответствии с общими техническими требованиями ГОСТ 183—74.

Таблица П16-1

Части электрических машин	Предельная допустимая температура, °С, при использовании изоляционных материалов классов (по ГОСТ 8865—70)														
	A			E			B			F			H		
	при измерении методом														
	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу
1. Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ×А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	—	60		—	70		—	80		—	1000		—	125	
2. Обмотки: а) обмотки переменного тока машин мощностью	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—

Продолжение табл. П16-1

Части электрических машин	Предельная допустимая температура, °C, при использовании изоляционных материалов классов (по ГОСТ 8865—70)														
	A			E			B			F			H		
	при измерении методом														
	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу
менее 5000 кВ · А или с длиной сердечника менее 1 м б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указан-	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—

ных в пп. 3, 4, 5 настоящей таблицы в) якорные обмотки, соединенные с коллектором	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—
3. Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	110	—	—	—	—
4. Обмотки: а) однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями б) стержневые обмотки роторов асинхронных машин	65		—	80		—	90		—	110		—	135		—

Продолжение табл. П16-1

Части электрических машин	Предельнаядопустимая температура, °С, при использовании изоляционных материалов классов (по ГОСТ 8865—70)														
	A			E			B			F			H		
	при измерении методом														
	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	термометра	сопротивления	температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу
5. Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	60		—	75		—	80		—	100		—	125		—
6. Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—

7. Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя 8. Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с обмотками	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов														
9. Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с обмотками	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
10. Коллекторы и контактные кольца, незащищенные и защищенные	60	—	—	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

Б. ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

При продолжительной работе турбогенераторов с номинальными нагрузками, указанными в ГОСТ 533—85 Е, предельные температуры активных и конструктивных частей турбогенераторов, соприкасающихся с изоляцией, не должны быть более указанных в ГОСТ 8865—70.

При этом допустимые температуры для изоляции классов B и F должны быть не более указанных в табл. П16-2.

Таблица П16-2

Части турбогенераторов или охлаждающая среда	Предельная допустимая температура, °C (не более), при использовании изоляционных материалов классов					
	B			F		
	при измерении методом					
	сопротивления	термометров сопротивления, заложенных между катушками в пазу, на дне паза и под клин	термометра	сопротивления	термометров сопротивления, заложенных между катушками в пазу, на дне паза и под клин	термометра
1. Охлаждающая жидкость, выходящая из обмотки статора, ротора и сердечника статора	—	—	85	—	—	85
2. Охлаждающий газ, выходящий из обмотки и сердечника статора	—	—	95	—	—	130
3. Обмотки статора:						
а) при косвенном охлаждении	—	105	—	—	140	—
б) при непосредственном охлаждении:						
газом	—	105	—	—	140	—
жидкостью	—	105	—	—	140	—
4. Обмотки ротора:						
а) при косвенном охлаждении	130	—	—	145	—	—
б) при непосредственном охлаждении:						

Части турбогенераторов или охлаждающая среда	Предельная допустимая температура, °С (не более), при использовании изоляционных материалов классов					
	B			F		
	при измерении методом					
	сопротивления	термометров сопротивления, заложенных между катушками в пазу, на дне паза и под клин	термометра	сопротивления	термометров сопротивления, заложенных между катушками в пазу, на дне паза и под клин	термометра
с выпуском не более чем в 2 зонах	100	—	—	115	—	—
с выпуском в 3—5 зонах	105	—	—	120	—	—
с выпуском в 6—7 зонах	110	—	—	125	—	—
с выпуском в 8 зонах и более по длине ротора	115	—	—	130	—	—
5 Активная сталь сердечника статора	—	105	—	—	140	—

Примечания. 1. При применении для обмоток турбогенераторов с изоляцией класса В по ГОСТ 8865—70 термореактивных связующих, имеющих класс нагревостойкости не ниже В, а также термопластичных связующих с температурой размягчения +130 °С и выше по ГОСТ 11506—73 указанные в табл. П16-2 допустимые температуры обмотки статора, активной стали сердечника статора и температура выходящего охлаждающего газа из обмотки и сердечника статора могут быть повышены на 15 °С.

2. Допустимая температура обмотки ротора, измеренная методом сопротивления, при непосредственном охлаждении жидкостью указывается в инструкции по эксплуатации турбогенераторов.

3. Измерение температуры методом термометров сопротивления, заложенных под клин, относится только к обмотке с жидкостным охлаждением.

4. Вентиляция ротора при непосредственном охлаждении обмотки газом характеризуется числом радиальных зон выхода газа по всей длине ротора. Зоны выхода охлаждающего газа из лобовых частей обмотки с одной стороны ротора учитываются как одна зона. Общие зоны выхода двух аксиально-противоположно направленных потоков охлаждающей среды рассматриваются как две зоны.

Номинальные данные турбогенераторов должны относиться к продолжительной работе при следующих условиях:

а) температура охлаждающей воды, поступающей в газоохладители или, при наличии теплообменников, в первый теплообменник со стороны начального поступления охлаждающей воды, именуемой в дальнейшем «охлаждающая вода», +33°С;

б) температура охлаждающего газа (воздух или водород), выходящего из газоохладителя, +40 °С;

в) температура поступающей охлаждающей жидкости (вода или масло), применяемой для непосредственного охлаждения электрических машин или их частей, +40 °С; высота места установки над уровнем моря не более 1000 м.

В. ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ

При продолжительной работе гидрогенераторов с номинальными нагрузками предельные допустимые превышения температуры активных частей гидрогенераторов не должны быть более указанных в ГОСТ 183—74 для соответствующего класса изоляции.

Предельные допустимые температуры при использовании изоляционных материалов классов В и F при температуре охлаждающего воздуха, указанной в ГОСТ 5616—81 Е, не должны быть более приведенных в табл. П16-3.

Таблица П16-3

Части гидрогенератора или охлаждающая среда	Предельная допустимая температура, °С (не более), при использовании изоляционных материалов классов					
	B			F		
	при измерении методом					
	сопротивления	термометров сопротивления	термометра	сопротивления	термометров сопротивления	термометра
1. Охлаждающая вода, выходящая из обмоток статора, ротора и сердечника статора	—	—	85	—	—	85
2. Обмотки статора:						
а) при косвенном воздушном охлаждении изоляции:						

Части гидрогенератора или охлаждающая среда	Предельная допустимая температура, °С (не более), при использовании изоляционных материалов классов					
	B			F		
	при измерении методом					
	сопротивления	термометров сопротивления	термометра	сопротивления	термометров сопротивления	термометра
микалентной компаундированной	—	105	—	—	—	—
термореактивной	—	120	—	—	140	—
б) при непосредственном водяном охлаждении и изоляции:						
микалентной компаундированной	—	105	—	—	—	—
термореактивной	—	120	—	—	140	—
3. Обмотки ротора:						
а) при косвенном воздушном охлаждении	130	—	—	145	—	—
б) при воздушном форсированном охлаждении	130	—	—	145	—	—
4. Активная сталь сердечника статора:						
а) при косвенном воздушном охлаждении обмотки статора и изоляции:						
микалентной компаундированной	—	105	—	—	—	—
термореактивной	—	120	—	—	140	—
б) при непосредственном водяном охлаждении обмотки статора и изоляции:						
микалентной компаундированной	—	105	—	—	—	—
термореактивной	—	120	—	—	140	—

Примечания. 1. Измерение температуры методом термометров сопротивления производится термометрами сопротивления, заложенными между катушками в пазу и на дне паза — при двухслойных обмотках статора; на дне паза и под клин — при однослойных обмотках статора.

2. Допускаемая температура обмотки ротора, измеренная методом сопротивления, при непосредственном охлаждении водой указывается в инструкции по эксплуатации гидрогенераторов.

Температура подшипников не должна превышать следующих предельно допустимых значений: для подшипников скольжения 80 °С (температура масла при этом не должна быть более 65 °С); для подшипников качения 100 °С.

Более высокая температура допускается, если применены специальные подшипники качения или специальные сорта масел при соответствующих материалах вкладышей для подшипников скольжения.

Г. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехфазные силовые масляные трансформаторы в соответствии с общими техническими требованиями ГОСТ 11677—85 предназначены для работы в следующих условиях:

а) климатическое исполнение по ГОСТ 15150—69 и 15543—70;

б) температура охлаждающей среды: для воды — не более +25 °С у входа в охладитель; для воздуха — естественно изменяющаяся температура охлаждающего воздуха не более +40 °С, кроме того, среднесуточная температура воздуха не более +30 °С, среднегодовая температура воздуха не более +20 °С;

в) температура окружающего воздуха не менее —45 °С.

Превышения температуры отдельных частей масляного трансформатора над температурой охлаждающей среды (воздух или вода) при тепловых испытаниях (на основном ответвлении) по любому из методов ГОСТ 3484—77 не должны превышать значений, указанных в ГОСТ 5616—81 Е.

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК МАШИН. ДОПУСКАЕМОЕ ЗНАЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

(Извлечение из ГОСТ 183—74)

А. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ОТНОСИТЕЛЬНО КОРПУСА МАШИНЫ И МЕЖДУ ОБМОТКАМИ

Изоляция обмоток относительно корпуса машины и между обмотками должна выдержать без повреждения в течение 1 мин

Таблица П17-1

Электрическая машина или ее части	Испытательное напряжение (действующее значение)
1. Машины мощностью менее 1 кВт (или 1 кВ·А) на номинальное напряжение ниже 100 В, за исключением указанных в пп. 4—8	500 В плюс номинальное напряжение
2. Машины мощностью от 1 кВт (или 1 кВ·А) и выше на номинальное напряжение ниже 100 В, за исключением указанных в п. 4	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение
3. Машины:	
а) мощностью до 1000 кВт (или 1000 кВ·А), за исключением перечисленных в пп. 1, 2 и 4—8	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение, но не менее 1500 В
б) мощностью от 1000 кВт (или 1000 кВ·А) и выше, за исключением указанных в пп. 4—8, на номинальное напряжение:	
до 3300 В включительно	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение
свыше 3300 до 6600 В включительно	2,5-кратное номинальное напряжение
свыше 6600 до 17 000 В включительно	3000 В плюс двукратное номинальное напряжение
свыше 17 000 В	по согласованию между изготовителем и потребителем
4. Обмотки возбуждения машин постоянного тока с независимым возбуждением	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение возбуждения, но не менее 1500 В
5. Обмотки возбуждения синхронных машин:	
а) генераторов, двигателей и компенсаторов, пускаемых специальными пусковыми двигателями	Десятикратное номинальное напряжение возбуждения электрической машины, но не менее 1500 В и не более 3500 В
б) машин, предназначенных для непосредственного пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на нагрузку, сопротивление которой не превышает десятикратное сопротивление обмотки возбуждения при постоянном токе, или на источник своего питания	То же
в) машин, предназначенных для пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на нагрузку, сопротив-	1000 В плюс двукратное максимальное действующее напряжение, которое можно полу-

Электрическая машина или ее части	Испытательное напряжение (действующее значение)
ление которой равно десятикратному сопротивлению обмотки или больше его, или с разомкнутой обмоткой возбуждения независимо от того, секционирована она или нет	чить при данных пусковых условиях между выводами обмотки возбуждения (между выводами любой секции), но не менее 1500 В (см. примечание 3)
6. Вторичные обмотки асинхронных двигателей, не находящихся непрерывно в короткозамкнутом состоянии:	
а) двигателей, допускающих торможение противовключением	1000 В плюс четырехкратное номинальное напряжение вторичной обмотки
б) двигателей, не предназначенных для торможения противовключением	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение вторичной обмотки
7. Возбудители (за исключением указанных ниже).	Как для обмоток, к которым присоединяются возбудители
Возбудители для синхронных двигателей (к ним относятся и синхронизированные асинхронные двигатели), если во время пуска они заземлены или отключены от обмоток возбуждения. Обмотки возбуждения возбудителей с независимым возбуждением	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение возбудителя, но не менее 1500 В
8. Собранные в группы электрические машины и аппараты	Если испытанию подвергается группа из нескольких новых, только что установленных и соединенных вместе электрических машин и аппаратов, из которых каждая машина и каждый аппарат проходили испытания на электрическую прочность, то испытательное напряжение не должно превышать 85 % испытательного напряжения той машины (или того аппарата), у которой (которого) это напряжение наименьшее

П р и м е ч а н и я. 1. Испытательное напряжение для машин с разными уровнями изоляции определяется по согласованию между изготовителем и потребителем.

2. Для двухфазных обмоток, имеющих общий вывод, номинальное напряжение, по которому определяется испытательное напряжение, следует брать равным 1,4 напряжения отдельной фазы.

3. Напряжение, получаемое при пусковых условиях между выводами обмоток возбуждения или между выводами секций, можно измерить при пониженном напряжении питания. Измеренное таким образом напряжение следует умножить на отношение напряжения, полученное при пусковых условиях, к пониженному напряжению питания.

4. Для обмоток одной или нескольких машин, которые связаны электрически, рассматриваемое напряжение — это максимальное напряжение по отношению к земле.

испытательное напряжение частоты 50 Гц, практически синусоидальное, указанное в табл. П17-1.

Изоляция обмоток относительно корпуса и между обмотками (фазами), которые уложены полностью или частично на месте установки машины, должна выдержать в течение 1 мин испытательное напряжение, равное 100 % испытательного напряжения, указанного в табл. П17-1.

Все электрические машины независимо от того, подвергалась ли на предприятии-изготовителе их изоляция испытанию напряжением, указанным в табл. П17-1, в собранном виде или отдельными частями, должны выдержать в течение 1 мин в собранном виде (после их установки перед сдачей в эксплуатацию) испытание изоляции напряжением, равным 80 % испытательного напряжения, указанного в табл. П17-1. Это испытание на месте установки является обязательным для турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов; для остальных машин это испытание проводят по усмотрению заказчика. Испытаниям повышенным напряжением должны предшествовать проверка сопротивления изоляции обмоток и сушка, если это необходимо.

Б. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕЖДУВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

Изоляция обмотки между смежными ее витками должна выдержать в течение 3 мин испытание повышенным напряжением. Это испытание проводят при холостом ходе электрической машины путем повышения подводимого (при испытании в режиме электродвигателя) или генерируемого (при испытании в режиме генератора) напряжения на 30 % сверх номинального. Для гидрогенераторов эта изоляция должна выдержать повышение напряжения на 50 % сверх номинального в течение 5 мин.

Для турбогенераторов изоляция обмотки между смежными ее витками должна выдержать напряжение, повышенное на 30%

сверх номинального напряжения турбогенератора, в течение 5 мин.

Для электрических машин постоянного тока с числом полюсов более четырех повышение напряжения при испытании не должно быть больше значения, при котором среднее напряжение между смежными коллекторными пластинами получается равным 24 В.

Для синхронных машин (кроме турбогенераторов и гидрогенераторов), у которых при номинальном токе возбуждения напряжение холостого хода превышает номинальное напряжение машины более чем на 30 %, испытание производят при напряжении холостого хода, соответствующем номинальному току возбуждения. Для возбудителей, рассчитанных на форсировку возбуждения, при которой напряжение возбудителя превосходит номинальное напряжение более чем на 30 %, испытание проводят при предельном напряжении форсировки в течение 1 мин.

Для трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором напряжение повышают при неподвижном и разомкнутом роторе.

При повышении напряжения на 30 и 50 % допускается одновременное повышение частоты. Если испытание проводят на вращающейся электрической машине, то повышение частоты не должно быть более 15 %.

Для машин с многовитковыми секциями рабочей обмотки с номинальным напряжением до 600 В включительно допускается применение устройств, основанных на принципе использования напряжения повышенной частоты.

В. СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

По ГОСТ 183—74 сопротивление изоляции обмоток электрической машины относительно корпуса и между обмотками должно устанавливаться в стандартах или технических условиях на конкретные виды машин.

Если перед пуском машины после монтажа (установки) или капитального ремонта нормативные данные об уровне изоляции получить затруднительно, то можно пользоваться нижеприведенными рекомендациями.

Сопротивление изоляции обмоток электрической машины r (в мегаомах) относительно ее корпуса и сопротивление изоляции между обмотками при рабочей температуре машины должно быть не менее значения, получаемого по формуле (но не менее 0,5 МОм):

$$r = \frac{U}{1000 + P/100},$$

где U — номинальное напряжение обмотки машины, В; P — номинальная мощность машины, кВ·А; для машин постоянного тока — в киловаттах.

В случае измерения сопротивления изоляции при температуре ниже рабочей полученное по этой формуле сопротивление изоляции следует удваивать на каждые 20 °С (полные и неполные) разности между рабочей температурой и той температурой, при которой выполнено измерение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андриянов А. Е.** Сушка электрических машин//Электрические станции. 1951. № 4. С. 55.

2. **Барский Р., Горбунов М.** Монтаж крупных электрических машин// Электрификация и электромонтер. 1935. № 12. С. 12—19. 1936. № 1. С. 19—29. № 2. С. 71—77. № 3. С. 97—103. № 4. С. 149—153.

3. **Брановский М. А., Сивков А. П.** Балансировка роторов турбогенераторов в собственных подшипниках. М.: Энергия, 1966.

4. **Брановский М. А.** Руководящие указания по балансировке роторов турбогенераторов в собственных подшипниках. М.: Энергия, 1967.

5. **Воронецкий Б. Б., Кучер Э. Р.** Магнитный шум асинхронных электродвигателей. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.

6. **Гейнрих В.** Проблема скользящего контакта в электромашиностроении. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1933.

7. **Ден-Гартог.** Теория колебаний. М.: Гостехтеориздат, 1960.

8. **Жерве Г. К.** Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.

9. **Завод «Электросила».** Описание и инструкция по подготовке к пуску и эксплуатации турбогенераторов серии Т-2 с воздушным охлаждением. МЭТП СССР, 1956.

10. **Инструкция** по сушке синхронных генераторов и компенсаторов в неподвижном состоянии. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953.

11. **Исакович М. М., Клейман Л. И., Перчанок Б. Х.** Устранение вибраций электрических машин. Л.: Энергия, 1969.

12. **Касьянов В. И.** Регулировка дополнительных полюсов машин постоянного тока//Электричество. 1934. № 20. С. 1—8. 1935. № 1. С. 45—49.

13. **Клейман Л. И.** Опыт применения подшипников с сегментными вкладышами в горизонтальных электрических машинах//Сборник «Электросила». Л.: Госэнергоиздат, 1961. № 20. С. 63—68.

14. **Комар Е. Г.** Вопросы эксплуатации турбогенераторов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950.

15. **Кондахчан В. С.** Эксплуатация трансформаторов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.

16. **Кофман К. Д.** Монтаж силового электрооборудования: Справочник электромонтера. М.: Энергия, 1967.

17. **Кунцевич А. С., Разумов Б. А., Ривлин Л. Б.** Фабрично-заводские электросиловые установки. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1940.

18. **Лифшиц П. С.** Щетки для электрических машин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961.

19. **Мещаников П. А.** Определение места замыкания на корпус обмотки ротора турбогенератора//Электрические станции. 1946. № 11. С. 58.

20. **Нейкирхен И.** Угольные щетки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1937.

21. **Нормы** испытания электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей. М.: Энергоиздат, 1982.

22. **Петров Г. Н.** Электрические машины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1966. Ч. 1: Трансформаторы.

23. **Ривлин Л. Б.** Электродвигатели и их эксплуатация. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950.

24. **Ривлин Л. Б.** Монтаж крупных электрических машин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.

25. **Рейнман Н. Ю.** Центровка паровых турбин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1942.

26. **Рихтер Р.** Электрические машины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1939. Т. 4: Индукционные машины.

27. **Синица А. И.** Ремонт и восстановление трансформаторов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1946.

28. **Соколов Д. В.** Монтаж электрооборудования трансформаторных подстанций промышленных предприятий. М.: Госстройиздат, 1952.

29. **Сыромятников И. А.** Сушка трансформаторов потерями в кожухе// Электрические станции. 1946. № 7.

30. **Сыромятников И. А.** Вопросы эксплуатации синхронных генераторов М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948.

31. **Фридман В. М.** Уравновешивание гибких валов по формам свободных колебаний// Уравновешивание роторов энергетических машин. М.: ЦИНТИЭП, 1962. С. 42—53.

32. **Шпизер Р., Грюттер Ф.** Неисправности электрических машин, трансформаторов и аппаратов. Л.: Судостроение, 1964.

33. **Юдицкий С. Б.** Коммутация машин постоянного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1941.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Производственное издание

ГЕМКЕ РУДОЛЬФ ГЕОРГИЕВИЧ

НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Редактор *Л. М. Пархоменко*
Художник обложки *Т. Ю. Теплицкая*
Технический редактор *Н. А. Минеева*
Корректор *Н. Б. Чухутина*

ИБ № 1312

Сдано в набор 01.06.88. Подписано в печать 27.12.88. М-45273. Формат 84 × 108¹/₃₂. Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 17,64. Усл. кр.-отт. 17,64. Уч.-изд. л. 19,29. Тираж 100 000 экз. Заказ 1598. Цена 1 р. 50 к.

Энергоатомиздат, Ленинградское отделение. 191065 Ленинград, Д-65, Марсово поле, 1.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.